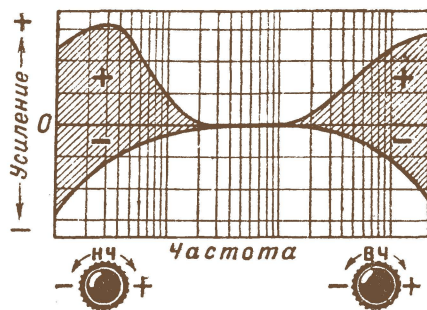


МАССОВАЯ  
**РАДИО-**  
БИБЛИОТЕКА



**А.Н. ШИПОВСКИЙ**

# **ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ**




**ГОСЭНЕРГОИЗДАТ**

Таблица децибел

дБ	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей		дБ	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей	
	Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление		Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление
0,1	1,01	0,989	1,02	0,977	4,2	1,62	0,617	2,63	0,380
0,2	1,02	0,977	1,05	0,955	4,4	1,66	0,603	2,75	0,363
0,3	1,03	0,966	1,07	0,933	4,6	1,70	0,589	2,88	0,347
0,4	1,05	0,955	1,10	0,912	4,8	1,74	0,575	3,02	0,331
0,5	1,06	0,944	1,12	0,891	5,0	1,78	0,562	3,16	0,316
0,6	1,07	0,933	1,15	0,871	5,5	1,88	0,531	3,55	0,282
0,7	1,08	0,923	1,17	0,851	6,0	1,99	0,501	3,98	0,251
0,8	1,10	0,912	1,20	0,832	6,5	2,11	0,473	4,47	0,224
0,9	1,11	0,902	1,23	0,813	7,0	2,24	0,447	5,01	0,199
1,0	1,12	0,891	1,26	0,794	7,5	2,37	0,422	5,62	0,178
1,1	1,13	0,881	1,29	0,776	8,0	2,51	0,398	6,31	0,158
1,2	1,15	0,871	1,32	0,759	8,5	2,66	0,376	7,08	0,141
1,3	1,16	0,861	1,35	0,741	9,0	2,82	0,355	7,94	0,126
1,4	1,17	0,851	1,38	0,724	9,5	2,98	0,335	8,91	0,112
1,5	1,19	0,841	1,41	0,708	10,0	3,16	0,316	10,00	0,100
1,6	1,20	0,832	1,44	0,692	11,0	3,55	0,282	12,6	0,079
1,7	1,22	0,822	1,48	0,676	12,0	3,98	0,251	15,8	0,063
1,8	1,23	0,813	1,51	0,661	13,0	4,47	0,224	19,9	0,050
1,9	1,24	0,803	1,55	0,646	14,0	5,01	0,199	25,1	0,040
2,0	1,26	0,794	1,58	0,631	15,0	5,62	0,178	31,6	0,032
2,2	1,29	0,776	1,66	0,603	16,0	6,31	0,158	39,8	0,025
2,4	1,32	0,759	1,74	0,575	17,0	7,08	0,141	50,1	0,020
2,6	1,35	0,741	1,82	0,550	18,0	7,94	0,126	63,1	0,016
2,8	1,38	0,724	1,90	0,525	19,0	8,91	0,112	79,4	0,013
3,0	1,41	0,708	1,99	0,501	20,0	10,00	0,100	100,0	0,010
3,2	1,44	0,692	2,09	0,479	25,0	17,7	0,056	$3,16 \cdot 10^2$	$3,16 \cdot 10^{-3}$
3,4	1,48	0,676	2,19	0,457	30,0	31,6	0,032	$10^3$	$10^{-3}$
3,6	1,51	0,661	2,29	0,436	35,0	56,0	0,018	$3,16 \cdot 10^3$	$3,16 \cdot 10^{-4}$
3,8	1,55	0,646	2,40	0,417	40,0	100,0	0,010	$10^4$	$10^{-4}$
4,0	1,58	0,631	2,51	0,398	50,0	316,0	0,003	$10^5$	$10^{-5}$



М А С С О В А Я  
 Р А Д И О    Б И Б Л И О Т Е К А

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 154

А. Н. ШИПОВСКИЙ

# ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

1952

ЛЕНИНГРАД

*Книга рассчитана на подготовленного радиолюбителя, знакомого с работой усилителей низкой частоты. В ней приводятся современные схемы усилителей низкой частоты, предназначенные для высококачественного воспроизведения звука, и даются указания по выбору схемы такого усилителя, его расчету и конструированию.*

---

Редактор А. Ф. Сенченков

Техн. редактор А. М. Фридкин

Сдано в набор 20/VI 1952 г.

Подписано к печати 16/X 1952 г.

Бумага  $84 \times 108 \frac{1}{32} = 11 \frac{1}{8}$  бумажных — 6,76 п. л.

Уч.-изд. л. 7,0

T-08702.

Тираж 15 000.

Зак. 3227

Цена 2 р. 80 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

---

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Радио — величайшее русское изобретение — благодаря неустанной заботе партии и правительства прочно вошло в культуру и быт советских людей. Оно приносит к нам известия о мирном труде нашего народа, научно-образовательные беседы, спектакли лучших театров страны, концерты мастеров искусств и многое другое. Радиовещание у нас стало мощным средством политического воспитания и просвещения народа.

Техника радиовещания в нашей стране непрерывно совершенствуется. Улучшаются качественные показатели всех звеньев тракта радиопередачи, начиная с микрофона и кончая громкоговорителем. Переход местного вещания на ультракороткие волны и частотную модуляцию открывает дальнейшие перспективы улучшения качества радиопередачи звукового сигнала.

Одновременно с этим растут требования к одному из основных узлов радиовещательного приемника — усилителю низкой частоты, который в значительной степени определяет качество воспроизведения звука.

Техника усиления низкой частоты достигла в настоящее время большой степени совершенства и позволяет воспроизводить весь диапазон звуковых частот с весьма малыми искажениями. Можно прямо сказать, что дальнейшее улучшение качества звучания радиоприемника лимитируется не усилителем низкой частоты, а скорее другими звеньями радиовещательного тракта и особенно громкоговорителем.

Цель настоящей брошюры — помочь радиолюбителю в выборе схемы и конструировании высококачественного усилителя, который позволил бы ему создать радиоустановку с высоким качеством звучания.

Безусловно, что от такого усилителя только тогда будет получен полный эффект, когда он будет применяться в сочетании с громкоговорителем или агрегатом громкоговорителей, способных воспроизводить достаточно широкую полосу частот.

Кроме того, источник входного сигнала, например УПЧ и детектор приемника, звукозаписывающее устройство и т. д., должны пропускать необходимую полосу частот без существенных искажений.

Наивысшее качество звучания будет получено при приеме передач с частотной модуляцией.

*Автор*

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<i>Глава первая. Условия для высококачественного воспроизведения звука . . . .</i>	<i>5</i>
1. Полоса воспроизводимых частот . . . . .	5
2. Нелинейные искажения . . . . .	9
3. Комбинационные тона . . . . .	13
4. Затухание громкоговорителя . . . . .	15
5. Выходная мощность звуковоспроизводящего тракта и динамический диапазон . . . . .	16
6. Фон и шумы . . . . .	18
<i>Глава вторая. Частотная характеристика усилителя . . . . .</i>	<i>19</i>
1. Частотные искажения в усилителе . . . . .	19
2. Методы регулирования частотной характеристики в усилителе . . . . .	58
3. Регулирование громкости . . . . .	57
<i>Глава третья. Нелинейные искажения в усилителе . . . . .</i>	<i></i>
1. Причины возникновения нелинейных искажений в усилителе . . . . .	62
2. Выбор лампы для оконечного каскада . . . . .	65
3. Выбор режима лампы оконечного каскада . . . . .	66
4. Применение двухтактной схемы . . . . .	70
5. Применение отрицательной обратной связи . . . . .	72
<i>Глава четвертая. Выходной трансформатор . . . . .</i>	<i>78</i>
1. Принцип действия трансформатора . . . . .	78
2. Эквивалентная схема реального трансформатора . . . . .	81
3. Частотная характеристика выходного каскада с трансформаторным выходом . . . . .	83
4. Расчет выходного трансформатора . . . . .	87
5. Конструкция широкополосного выходного трансформатора . . . . .	93
<i>Глава пятая. Фон переменного тока в усилителе низкой частоты . . . . .</i>	<i>97</i>
1. Пульсация анодного напряжения . . . . .	98
2. Наводки от цепей переменного тока . . . . .	100
3. Питание накала ламп переменным током . . . . .	102
<i>Глава шестая. Практические схемы высококачественных усилителей . . . . .</i>	<i>104</i>
1. Однотактная схема . . . . .	104
2. Схема двухтактного усилителя с отрицательной и положительной обратной связью . . . . .	105
3. Высококачественный усилитель с глубокой отрицательной обратной связью . . . . .	108
4. Двухканальный усилитель . . . . .	112
<i>Глава седьмая. Конструирование и налаживание высококачественных усилителей</i>	<i>115</i>
1. Замечания по конструированию усилителей . . . . .	115
2. Налаживание усилителя и меры борьбы с самовозбуждением . . . . .	116
3. Громкоговоритель для высококачественного звуковоспроизведения . . . . .	118

## *Глава первая.*

### **УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗВУКА**

Идеальным воспроизведением звука считается такое воспроизведение, при котором слушатель не может отличить искусственное звучание от натурального. Установки для такого, близкого к идеальному воспроизведения осуществимы пока только в лабораторных условиях. Рассмотрим, какими показателями определяется качество воспроизведения звука вообще.

#### **1. ПОЛОСА ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЧАСТОТ**

Человеческое ухо способно воспринимать звуковые колебания, частота которых лежит в пределах от 20 до 20 000 *гц*.

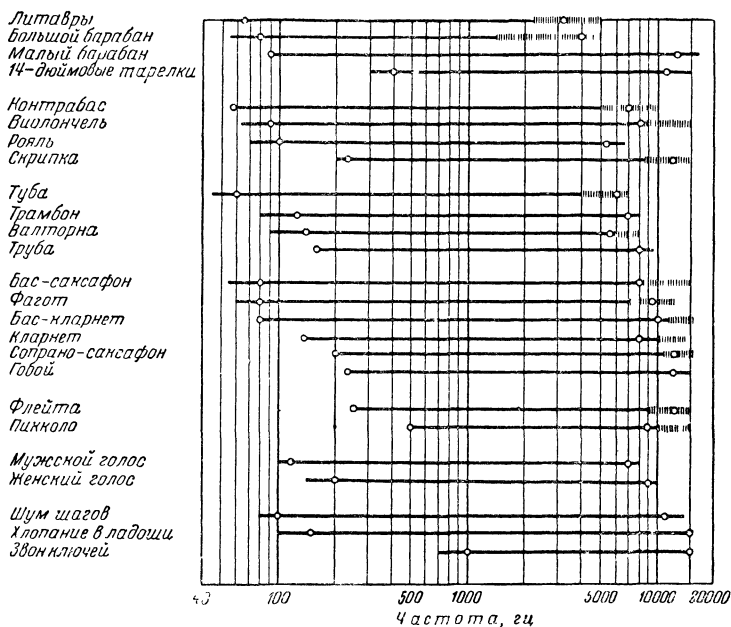
Строго говоря, для обеспечения полной естественности звучания тракт звуковоспроизведения должен передавать всю эту полосу частот без заметных искажений. Однако воспроизведение полного звукового диапазона представляет большие технические трудности, заставляющие сужать полосу воспроизводимых частот.

Какую же полосу частот нужно считать действительно необходимой для высококачественного воспроизведения речи и музыки? На фиг. 1 приведен график, где сплошными линиями показано, какой диапазон частот необходим для неискаженной передачи звучания музыкальных инструментов, человеческого голоса и других звуков.

Этот график был составлен на основании тщательно проведенного опыта. Устройство, состоявшее из микрофона усилителя и громкоговорителя, воспроизводило без искажений полосу частот от 30 до 15 000 *гц*. Специальными фильтрами полосу частот можно было ограничивать как «снизу», так и «сверху». Большому числу экспертов предлагалось

прослушивать передачу звучания различных инструментов, сначала без изменения полосы частот усилителя и громкоговорителя, а затем полоса сужалась до тех пор, пока, по мнению экспертов, замечалось ухудшение звучания.

Точками на фиг. 1 указаны пограничные частоты фильтров, при включении которых (т. е. при срезании частот выше или ниже пограничных) 80% экспертов не замечало изме-



Фиг. 1. Диапазоны частот различных музыкальных инструментов, человеческого голоса и шумов.

нений в качестве воспроизведения. Вертикальными черточками заштрихованы полосы частот, при срезании которых ухудшалось качество воспроизведения характерных шумов, сопровождавших игру на данном инструменте (например, шума трения смычка о струны скрипки, стука клапанов и свиста струи воздуха на духовых инструментах и т. п.).

Из графика фиг. 1 видно, что полосы частот от 40 до 15 000 Гц совершенно достаточно для воспроизведения звучания основных музыкальных инструментов, голоса и шумов без заметных искажений (в испытание не входило прослушивание большого органа, имеющего низшую частоту звучания 16 Гц).

Насколько же возможно дальнейшее сужение полосы частот без значительного снижения качества? Ответ на этот вопрос был дан в свое время также опытным путем.

Группе экспертов было предложено оценить качество воспроизведения звучания симфонического оркестра при последовательном сужении полосы частот тракта как со стороны низких, так и со стороны высоких звуковых частот. Результаты этого исследования приведены на фиг. 2, причем за 100-процентное качество принято качество воспроизведения при полосе частот от 40 до 15 000 гц.

Вопрос о необходимой полосе воспроизведения является в настоящее время еще в достаточной степени спорным. По мнению многих специалистов, для радиовещательной установки высшего класса нужно обеспечить полосу воспроизводимых частот от 30 до 15 000 гц.

Выбранная полоса частот должна воспроизводиться трактом одинаково хорошо; об этом судят по коэффициенту усиления  $K$ , равному отношению амплитуды переменного напряжения  $U_{вых}$  на выходе тракта к амплитуде переменного напряжения  $U_{вх}$ , поданного на его вход, т. е.

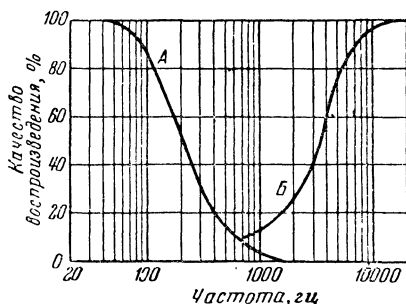
$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

Напомним, что воспринимаемое ухом человека изменение громкости пропорционально логарифму от соответствующего изменения звуковой энергии. Поэтому часто усиление измеряют в децибелах.

Усиление в децибелах равно двадцати десятичным логарифмам отношения напряжения на выходе к напряжению на входе, т. е.

$$K = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \text{ дб.}$$

Зависимость коэффициента усиления от частоты называется частотной характеристикой. На фиг. 3 изображен



Фиг. 2. Качество воспроизведения музыки при различных ограничениях воспроизводимой полосы частот.

А — кривая ограничения низких звуковых частот; Б — кривая ограничения высоких звуковых частот.

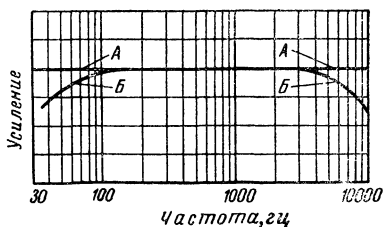
график частотной характеристики. Шкала частот обычно откладывается в логарифмическом масштабе, что позволит обеспечить достаточную точность изображения как на низких, так и на высоких звуковых частотах.

Часто при построении частотной характеристики по вертикальной оси (оси ординат) откладывают не коэффициент усиления  $K$ , а величину отклонения усиления от среднего уровня  $\Delta K$ , выраженного в децибелах, т. е.

$$\Delta K = K_0 - K_f,$$

где  $K_0$  — усиление на средних частотах диапазона, *дб*;  
 $K_f$  — усиление на данной частоте, *дб*.

Частотная характеристика воспроизведения должна быть линейной и горизонтальной. Отклонение характеристики от



Фиг. 3. Частотная характеристика тракта.

А — линейная; Б — искаженная.

горизонтальной линии должно быть минимальным, иначе оно будет восприниматься ухом как искажение. Установлено, что неравномерность в 2 *дб* еще не ощущается на слух.

Искажение частотной характеристики (частотные искажения) возникают в той или иной степени во всех звеньях тракта. В том слу-

чае, когда эти искажения одного характера (например, только подъем или только западание), они взаимно складываются, т. е. общие частотные искажения будут больше искажений каждого звена в отдельности.

Возможен и другой случай, когда наряду с искажениями одного характера в одних звеньях в других звеньях наблюдаются искажения противоположного характера. В этом случае общие частотные искажения полного тракта будут уменьшены, а правильным подбором частотных характеристик отдельных входящих в тракт звеньев — сведены к нулю. Такой метод уменьшения частотных искажений называется взаимной частотной коррекцией и широко применяется в технике радиовещания.

Если частотные характеристики отдельных звеньев не могут быть заранее известны, то для возможности частотной коррекции нужно иметь корректирующее устройство с регулируемой частотной характеристикой.

## 2. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Величина нелинейных искажений или коэффициент нелинейности является одним из важнейших качественных показателей всякого радиовещательного тракта вообще и усилителя низкой частоты в частности.

Для того чтобы правильно судить о допустимости нелинейных искажений в тракте звуковоспроизведения, нужно познакомиться с сущностью нелинейных искажений и их влиянием на качество воспроизведения.

Нелинейные искажения, вносимые каким-либо элементом тракта, выражаются в том, что форма сигнала на выходе его искажается по сравнению с формой сигнала на входе.

Причиной нелинейных искажений является прохождение сигнала через устройство с нелинейной амплитудной характеристикой. Одним из таких устройств может быть электронная лампа.

Если на управляющую сетку лампы подать синусоидальное напряжение, амплитуда которого превосходит пределы линейного участка ее характеристики, то форма анодного тока будет представлять собой искаженную синусоиду.

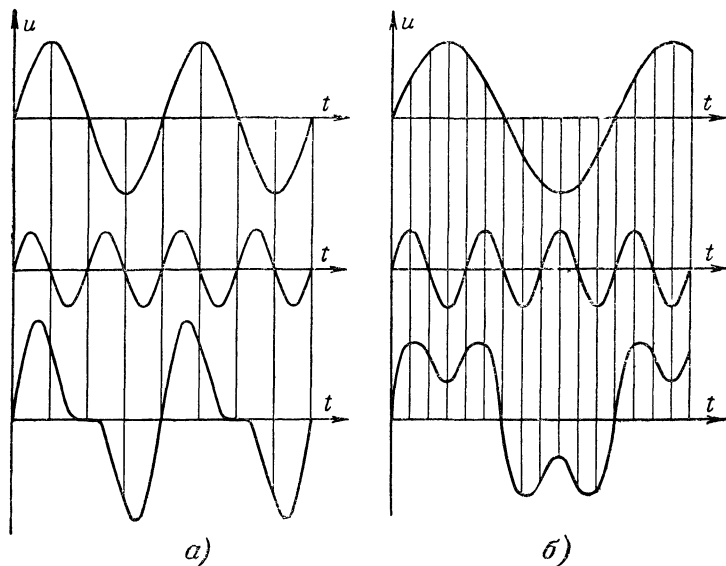
Из основ электротехники известно, что периодическое напряжение несинусоидальной формы можно представить как сумму нескольких синусоидальных напряжений, называемых гармониками. Гармоника, частота которой равна частоте периодического несинусоидального напряжения, называется первой или основной гармоникой. Другие гармоники называются высшими (второй, третьей и т. д. в зависимости от того, во сколько раз частота гармоники выше основной).

В зависимости от того, какова форма кривой рассматриваемого несинусоидального периодического напряжения, число входящих в него гармоник, их амплитуда и фаза могут быть различными. Сказанное можно пояснить простейшими графическими примерами. На фиг. 4,а показана форма кривой напряжения, которая получилась при сложении первой и второй гармоник, а на фиг. 4,б — при сложении первой и третьей гармоник.

Эти примеры являются простейшими, однако формы напряжения, показанные на фиг. 4, очень напоминают те формы напряжения, которые получаются на выходе усилителя при наличии в нем нелинейных искажений. При этом на вход усилителя подается простое синусоидальное напряжение, а на его выходе получается то же синусоидальное

напряжение, да еще ряд дополнительных частот, не содержащихся во входном напряжении, т. е. выходное напряжение, кроме первой гармоники, содержит вторую или третью или ту и другую одновременно. Эти дополнительные частоты (гармоники) проявляются в виде дребезжания, хрипов, в той или иной степени искажающих воспроизведение звука.

Количество и амплитуда гармоник на выходе усилителя характеризуют степень нелинейных искажений в нем. Для



Фиг. 4. Образование сложной формы напряжения.

а — при сложении первой и второй гармоник; б — при сложении первой и третьей гармоник.

количественной оценки искажений введен коэффициент нелинейности, который численно равен квадратному корню из суммы квадратов амплитуд всех гармоник (кроме первой), поделенному на амплитуду первой гармоники, и обозначается буквой  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и т. д. — амплитуды гармоник. Коэффициент нелинейности выражается в процентах.

Электронная лампа является не единственным источником нелинейных искажений. Такие звенья тракта, как микрофон, выходной трансформатор, громкоговоритель и др.,



также вносят нелинейные искажения в воспроизводимый сигнал.

Насколько же наше ухо чувствительно к нелинейным искажениям и при каком значении коэффициента нелинейности слушатель уже начинает ощущать искажение передачи?

На этот вопрос нельзя дать однозначный ответ, потому что степень восприятия нелинейных искажений зависит от ряда обстоятельств, важнейшие из которых следующие:

1. Чем шире полоса пропускания тракта, тем заметнее нелинейные искажения.

2. Если гармоники попадают в область наибольшей чувствительности уха (частоты порядка 800—1 000 *гц*), нелинейные искажения становятся заметнее.

3. Чем больше пик в передаваемом звуковом материале и чем большая часть передаваемого материала попадет в область перегрузки тракта, тем заметнее нелинейные искажения.

4. Различимость нелинейных искажений при передаче одного тона больше, чем при передаче сложного, состоящего из многих частот звука (оркестр).

5. При передаче двух тонов, близких друг к другу по частоте, восприятие нелинейных искажений значительно сильнее, чем при передаче одного тона.

6. Различимость нелинейных искажений зависит от формы амплитудной характеристики интересующего нас звена тракта, т. е. от того, преобладает ли в искаженном сигнале вторая или третья гармоника.

7. Восприятие нелинейных искажений человеческим ухом зависит от того, меняется ли коэффициент нелинейности с изменением частоты, и если меняется, то по какому закону, т. е. от того, какова частотная характеристика нелинейных искажений.

Для выяснения количественной оценки восприятия нелинейных искажений была проделана экспериментальная работа. В этой работе использовался тракт, в котором можно было в широких пределах менять степень нелинейных искажений, а также и их характер, добиваясь преобладания второй или третьей гармоники. Через тракт передавались отрывки музыкальных передач и речи, а также сигналы, имеющие одну или две частоты. Воспроизведение передаваемого материала сравнивалось с воспроизведением его же через тракт, имеющий ничтожно малые искажения. Сравнение производилось группой экспертов, в которую

входило от 4 до 6 человек. Оценка давалась в баллах от 0 до 5.

Нулевому баллу соответствовала такая передача, при которой даже самое внимательное сравнение не давало возможности отличить искаженную передачу от неискаженной. При оценке в 1 балл искажения были заметны лишь при внимательном сравнении. Оценке в 2 балла соответствовали такие искажения, которые позволяли без напряжения внимания отличить искаженную передачу от неискаженной. При 3 баллах искажения были отчетливо заметны без сравнения. При 4 баллах наблюдались сильные, а при 5 баллах — весьма сильные и неприятные искажения (передаваемый материал искажался до неузнаваемости).

Уровень передачи устанавливался таким образом, чтобы при пиках коэффициент нелинейности достигал заранее выбранной величины. Оценка в 1 балл соответствовала критической величине коэффициента нелинейности, при которой искажения становятся заметными. Были проведены три серии опытов. Первоначально давалась оценка работе тракта с коэффициентом нелинейности, не зависящим от частоты, причем были получены следующие результаты:

1. При передаче через тракт чистого тона, частота которого последовательно устанавливалась равной 100, 1 000 и 4 000 *гц*, и преобладании в искаженном сигнале второй гармоники наименьший критический коэффициент нелинейности наблюдался при частоте 1 000 *гц* и оказался равным 0,7%. При частоте 100 *гц* он был равен 2%, а при частоте 4 000 *гц* составлял 4%.

2. При одновременном звучании двух тонов критический коэффициент нелинейности оказался значительно ниже, чем при одном (чистом) тоне. Так, с частотами 800 и 1 200 *гц* искажения замечались при  $\gamma = 0,1\%$ , с частотами 800 и 900 *гц* — при  $\gamma = 0,7\%$  и с частотами 800 и 850 *гц* — при  $\gamma = 1,3\%$ .

3. При передаче музыки нелинейные искажения начинали сказываться при коэффициенте нелинейности 4%.

4. При передаче речи критический коэффициент нелинейности был равен 6% для случая преобладания второй гармоники и 4% — для третьей гармоники.

Во второй серии опытов искажения вводились только в пределах одной какой-либо октавы<sup>1</sup>. При этом оказалось,

---

<sup>1</sup> Октавой называется интервал между частотами, относящимися друг к другу, как 1:2 (например, интервал между частотами 30 и 60 *гц*, 5 000 и 10 000 *гц* и т. д.).

что наибольшая различимость нелинейных искажений была для октавы, средняя частота которой равнялась 1000 *гц*.

В третьей серии опытов в искажающий канал вводились специальные фильтры, позволяющие придавать нелинейным искажениям различную зависимость от частоты. Наибольшая заметность искажений наблюдалась при передаче речи, в случае преобладания третьей гармоники и при таких частотных характеристиках нелинейных искажений, когда искажения сосредоточивались на одном участке частотной характеристики, т. е. на низких, средних или высоких частотах. Критический коэффициент нелинейности в этом случае равен 7%. Наименьшая различимость искажений (30%) получилась при передаче речи, преобладании второй гармоники и такой частотной характеристике коэффициента нелинейности, когда минимум нелинейных искажений приходился на средние частоты. Остальные опыты дали значения критического коэффициента нелинейных искажений, являющиеся средними между двумя приведенными.

Описанные опыты, безусловно, не дают исчерпывающих данных, которые позволили бы выработать твердые нормы допустимых нелинейных искажений для высококачественного тракта звуковоспроизведения, однако на основании их можно сказать, что различимость нелинейных искажений меняется в широких пределах, а минимальное значение коэффициента нелинейности, при котором искажения становятся заметными, колеблется от 0,1 до 30%.

Учитывая большое разнообразие звукового материала, который может проходить через тракт звуковоспроизведения, мы должны предъявлять к нему весьма жесткие требования в отношении нелинейных искажений и стремиться к уменьшению коэффициента нелинейности хотя бы на средних и высоких звуковых частотах до величины порядка 1% и меньше. На низких звуковых частотах можно допустить коэффициент нелинейности порядка 1—2%.

### **3. КОМБИНАЦИОННЫЕ ТОНА**

Выше было сказано, что при передаче через тракт двух различных по частоте сигналов нелинейные искажения становятся заметными при значительно меньшей величине коэффициента нелинейности, чем это имеет место при передаче одного чистого тона; это объясняется появлением на выходе тракта наряду с гармониками так называемых комбинационных частот.

Что же такое комбинационные частоты и чем они отличаются от гармоник?

С образованием гармоник при прохождении сигнала через нелинейную систему мы уже познакомились.

Если на вход линейной системы подать два различных по частоте синусоидальных напряжения, имеющих частоты  $f_1$  и  $f_2$ , то на выходе ее появятся два напряжения с теми же частотами ( $f_1$  и  $f_2$ ).

Другое явление наблюдается в том случае, если мы те же два напряжения подадим на вход какой-либо нелинейной системы. При этом напряжение или ток на выходе будут иметь более сложную форму. В выходном сигнале будут содержаться напряжения с частотами, равными двум частотам входного напряжения ( $f_1$  и  $f_2$ ), но кроме этих частот, появятся следующие:  $2f_1$ ;  $2f_2$ ;  $3f_1$ ;  $3f_2$  и т. д., т. е. вторая и третья гармоники входных напряжений, а также разностные и суммарные комбинационные частоты:  $f_1+f_2$ ;  $f_1-f_2$ ;  $2f_1+f_2$ ;  $f_1+2f_2$ ;  $2f_1-f_2$ ;  $2f_2-f_1$  и т. д. Наиболее интенсивными будут основные комбинационные частоты, равные сумме или разности входных частот  $f_1$  и  $f_2$ .

Допустим, что на входе тракта действуют два напряжения, одно из которых имеет частоту 800 гц, а другое — 1 200 гц. Комбинационными частотами в данном случае будут: суммарная частота  $800 + 1\,200 = 2\,000$  гц и разностная частота  $1\,200 - 800 = 400$  гц. Ни той, ни другой частоты во входном сигнале не было; следовательно, они будут вносить искажения в передачу.

Особенно неприятное ощущение вызывают разностные частоты, появляющиеся от двух близких по частоте высоких тонов, например при пении двух женских голосов, звучании двух скрипок или флейт. Разностные тона в таком случае получаются низкими и очень неприятно действуют на слух.

В настоящее время нелинейные искажения оцениваются главным образом по величине коэффициента нелинейности, хотя его величина и не позволяет полностью оценить те искажения, которые вносит тракт. Дело в том, что комбинационные тона начинают сказываться заметно на качестве передачи при значительно меньшем коэффициенте нелинейности, чем гармоники, а величина коэффициента нелинейности, являясь функцией нелинейности системы, только косвенным путем позволяет судить и о комбинационных тонах. Но коэффициент нелинейности легче измерить, поэтому он до сих пор и применяется в качестве основного показателя степени нелинейных искажений в тракте.

#### 4. ЗАТУХАНИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ

Радиолюбители хорошо знают, что некоторые громкоговорители лучше воспроизводят низкие звуковые частоты, а другие—более высокие. Это объясняется наличием разных механических резонансов у подвижной системы громкоговорителя, что и ухудшает качество звучания, создает бубнящий звук, подчеркивает какие-то определенные частоты.

Механическую колебательную систему для удобства изучения можно уподобить некоторому электрическому колебательному контуру.

Электрический колебательный контур, как известно, содержит емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$ . При известных условиях, а именно при достаточно малом  $R$ , в контуре могут возникать затухающие электрические колебания, если на него воздействует какая-то внешняя э. д. с. Известно также, что скорость затухания зависит от величины активного сопротивления контура: чем больше это сопротивление, тем быстрее затухают колебания в контуре. При некотором сопротивлении, называемом критическим, колебания возникать не могут, и контур становится аperiодическим.

Мы уже сказали, что подвижную систему громкоговорителя можно уподобить электрическому колебательному контуру. Роль индуктивности в такой системе выполняет масса (вес диффузора и звуковой катушки). Упругость системы, зависящая от упругости центрирующей шайбы и гофра, диффузора, выполняет роль емкости. Сопротивление такого механического колебательного контура будет определяться рядом причин. Во-первых, — это силы трения при изгибе центрирующей шайбы и гофра, во-вторых, — сопротивление воздуха при колебаниях диффузора.

Третьей причиной, увеличивающей сопротивление движению диффузора, являются токи, наводимые подвижной катушкой громкоговорителя при ее движении в магнитном поле зазора магнитной системы. Эти токи возбуждают вокруг катушки магнитное поле, противодействующее полю в зазоре. При этом сопротивление будет тем больше, чем сильнее магнитное поле в зазоре и чем меньше сопротивление электрической цепи, с которой связана звуковая катушка.

Если в электрическом колебательном контуре, применяемом в радиоприемнике, его резонансные свойства являются полезными, то в громкоговорителе резонанс подвижной си-

стемы ухудшает качество звучания, создаст бубнящий звук, подчеркивает какие-то определенные частоты.

Поэтому при конструировании громкоговорителя стремятся свести его резонансные свойства к минимуму, а частоту собственного резонанса сделать как можно ниже.

На уменьшение резонансных свойств громкоговорителя положительно влияет также уменьшение выходного сопротивления усилителя, к которому громкоговоритель подключается. В хороших усилителях выходное сопротивление удается снизить до 0,5—0,6 ом.

## **5. ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕГО ТРАКТА И ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН**

На какую мощность рассчитывать высококачественный тракт звуковоспроизведения, а следовательно, и усилитель низкой частоты? Часто радиолюбитель совершенно неверно оценивает значение выходной мощности усилителя и громкоговорителя, связывая ее только с той громкостью, которая при той или иной мощности может быть получена. Для жилой комнаты средних размеров для получения полной громкости в ней достаточна мощность порядка 1—2 вт. Однако все высококачественные усилители рассчитываются на неискаженную выходную мощность (пиковую мощность) порядка 10—25 вт. Значит ли это, что в данном случае преследуется цель получения какой-то необычайно большой громкости? Конечно, нет. Для чего же тогда нужна эта мощность? Для ответа на этот вопрос необходимо познакомиться с так называемым динамическим диапазоном звучания.

Динамическим диапазоном музыки и речи называется отношение между максимальной и минимальной интенсивностью звука, выражаемое обычно в децибелах.

Наименьшим динамическим диапазоном обладают духовые инструменты, в особенности деревянные. Наибольший динамический диапазон порядка 70 дб имеет симфонический оркестр. Динамический диапазон речи равен 40—50 дб.

Для того, чтобы радиослушатель получил впечатление полной натуральности передачи, нужно, чтобы тракт позволял воспроизвести весь динамический диапазон передаваемого материала без заметных искажений.

Воспроизведение полного динамического диапазона оркестра (70 дб) представляет большие технические трудности. Тракт, рассчитанный на такое воспроизведение, неиз-

бежно должен получиться очень сложным, громоздким, и дорогим. Помимо этого, воспроизведение полного динамического диапазона в условиях жилой комнаты невозможно по двум причинам.

Во-первых, воспроизведение минимальных громкостей ограничивается шумами, которые неизбежно имеют место в любой жилой комнате и проникают в нее с улицы. По измерениям одной из наших электроакустических лабораторий для жилых комнат Москвы уровень шумов колеблется от 25 до 50 дб. Для средней комнаты в большом городе уровень шумов можно принять в среднем равным 35 дб. Для того чтобы иметь возможность воспроизведения наиболее слабых звуков, мы должны обеспечить перекрытие ими уровня шумов по крайней мере на 10 дб; следовательно, минимальный уровень громкости, который должен давать тракт звуковоспроизведения, должен быть порядка 45 дб.

Во-вторых, максимально допустимый уровень громкости в жилых помещениях установлен порядка 90 дб, в то время как для воспроизведения звучания симфонического оркестра нужно было бы обеспечить уровень 115 дб.

Ограничение минимальной громкости уровнем 45 дб и максимальной—90 дб приводит к тому, что наибольший динамический диапазон, который в настоящее время можно обеспечить в радиовещательном тракте, сокращается до 45 дб.

В настоящее время динамический диапазон в радиовещании искусственно ограничивается в электрических цепях тракта до 40 дб. Повышение усиления при наиболее слабых звуках позволяет более выгодно передавать их на фоне шумов и помех. Уменьшение усиления при наиболее громких звуках позволяет передавать их с меньшими нелинейными искажениями. Динамический диапазон 40—50 дб должны обеспечивать все звенья радиовещательного тракта.

Усилитель низкой частоты, предназначенный для высококачественного воспроизведения музыки и речи, должен воспроизводить без сколько-нибудь заметных нелинейных искажений динамический диапазон 40—50 дб. Какова же должна быть его номинальная мощность?

Для обеспечения динамического диапазона 50 дб максимальная громкость звучания должна составить 95 дб. Соответствующие расчеты показывают, что для обеспечения неискаженного звучания с такой громкостью в комнате разме-

рами  $10 \times 8 \times 6$  м<sup>3</sup> нужна мощность порядка 12 вт. Эта мощность может служить ориентировочной для выбора пиковой мощности высококачественного усилителя; она должна быть больше или меньше в зависимости от размеров помещения.

## 6. ФОН И ШУМЫ

Выше было сказано о том, что динамический диапазон радиопередачи ограничивается снизу шумами помещения, которые возникают в самом помещении, а также проникают в него с улицы. Кроме этих шумов, которые являются привычными для нашего уха, существуют другие, возникающие в самом тракте звуковоспроизведения. Они также могут снижать полезный динамический диапазон передачи в том случае, если их интенсивность велика.

Шумы, возникающие в тракте, могут иметь различный характер и происхождение.

При питании звеньев тракта от выпрямителей переменного тока возникает опасность появления помех из-за пульсаций постоянного тока. Эти пульсации, попадая на сетки ламп, создают на выходе усилителя шум, называемый фоном переменного тока. Это проявляется в виде характерного гудения, сопровождающего передачу и снижающего ее художественную ценность. Фон переменного тока может появиться и как следствие наводок на цепи и узлы тракта со стороны цепей, несущих переменный ток.

Наряду с фоном переменного тока радиопередача сопровождается различного происхождения шумами; к ним относятся внутриламповые шумы в усилителях низкой частоты, шум в супергетеродинном приемнике, атмосферные помехи, промышленные помехи, помехи от соседних по частоте радиостанций, шум иглы при проигрывании граммпластинок и т. п.

Особенно заметными становятся фон и шумы в паузах передач и при воспроизведении слабых звуков.

Для того чтобы шумы не мешали передаче, уровень фона и шумов на выходе тракта должен быть по крайней мере на 20 дБ ниже самого слабого сигнала. Это обстоятельство должно обязательно учитываться в тех случаях, когда от радиоустановки требуют высокого качества звучания.

Мы познакомились, насколько это возможно в объеме настоящей брошюры, с основными показателями высококачественного тракта воспроизведения звука. На основании



сказанного можно предъявить следующие ориентировочные требования к усилителю для звуковоспроизведения:

1. Частотная характеристика усилителя должна обеспечивать воспроизведение частотного диапазона от 30 до 15 000 *гц* с неравномерностью в пределах полосы не более 2 *дб*. Кроме того, частотная характеристика усилителя должна регулироваться в случае необходимости коррекции частотных характеристик предыдущих звеньев тракта.

2. Должно быть обеспечено неискаженное воспроизведение динамического диапазона 40—50 *дб* (выходная мощность 10—25 *вт*). Коэффициент нелинейности усилителя тракта не должен превышать 1% на средних и высоких звуковых частотах и 2% — на низких частотах при пиковом сигнале.

3. Оконечный усилитель тракта должен обеспечивать возможно большее затухание собственных колебаний акустической системы, т. е. иметь малое выходное сопротивление.

4. Фон переменного тока и шумы на выходе тракта должны быть минимальными и не менее чем на 20 *дб* ниже уровня минимального полезного сигнала.

Правильно сконструированный усилитель низкой частоты вполне может удовлетворить всем этим требованиям.

Но для того чтобы правильно выбрать схему и собрать усилитель, нужно знать причины возникновения в нем различного вида искажений. Поэтому дальше мы и переходим к рассмотрению этих вопросов.

## *Глава вторая*

### **ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСИЛИТЕЛЯ**

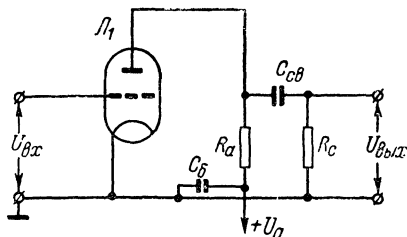
Частотной характеристикой усилителя называется график, показывающий зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты. Усилитель, не вносящий частотных искажений, должен иметь частотную характеристику, представляющую собой прямую горизонтальную линию, а всякое отклонение характеристики от этой прямой указывает на частотные искажения.

#### **1. ЧАСТОТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЕ**

Рассмотрим причины возникновения частотных искажений в усилителях на сопротивлениях, обычно применяемых в качестве предварительного и предоконечного каскадов усилителя.

На фиг. 5 изображена принципиальная схема каскада усилителя на сопротивлениях.

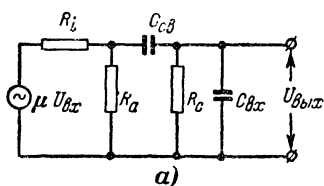
На сетку лампы  $L_1$  подается переменное напряжение  $U_{вх}$ , которое является входным для этого каскада. Благодаря усиливающему действию лампы на анодной нагрузке  $R_a$  выделяется усиленное напряжение, которое через конденсатор связи  $C_{св}$  поступает на сетку лампы следующего каскада усилителя с сопротивлением утечки  $R_c$ . Назовем это напряжение  $U_{вых}$ .



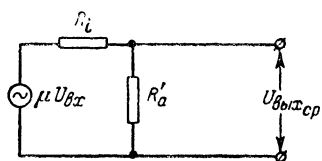
Фиг. 5. Принципиальная схема усилительного каскада на сопротивлениях.

Рассмотрим теперь зависимость коэффициента усиления  $K = U_{вых} / U_{вх}$  каскада от частоты. Для удобства изучения заменим принципиальную схему каскада фиг. 5 эквивалентной ей схемой фиг. 6, а. На этой эквивалентной схеме лампа заменена

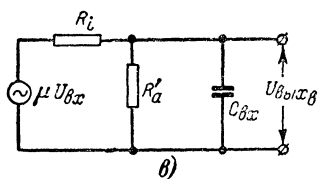
Рассмотрим теперь зависимость коэффициента усиления  $K = U_{вых} / U_{вх}$  каскада от частоты.



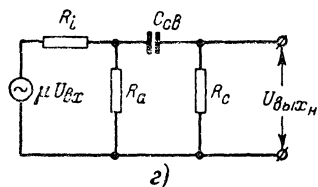
а)



б)



в)



г)

Фиг. 6. Эквивалентные схемы усилительного каскада на сопротивлениях.

а — общая схема; б — схема для средних частот; в — схема для высоких частот; г — схема для низких частот.

генератором, развивающим на своих зажимах э. д. с. (равную коэффициенту усиления лампы, помноженному на входное напряжение, т. е.  $\mu U_{вх}$ ) и обладающим внутренним сопротивлением  $R_i$  (равным внутреннему сопротивлению лампы).

Нагрузкой генератора являются сопротивление  $R_a$  и сопротивление  $R_c$ .

Для более точного представления о работе каскада необходимо учесть наличие междуэлектродных емкостей в лампах, емкость монтажа и входную емкость следующего каскада. Все эти емкости целесообразно объединить в одну, обозначив их общим названием  $C_{ex}$ . Величина  $C_{ex}$  емкости определяется по формуле

$$C_{ex} = C_{ck2} + C_{ac2} \cdot (1 + K_2) + C_{ak1} + C_m \text{ мкмкф},$$

где  $C_{ck2}$  — емкость сетка — катод лампы второго каскада;

$C_{ac2}$  — емкость анод — сетка лампы второго каскада;

$K_2$  — коэффициент усиления второго каскада;

$C_{ak1}$  — емкость анод — катод первого каскада;

$C_m$  — емкость монтажа (обычно  $5 \div 30$  мкмкф).

Величина входной емкости  $C_{ex}$  обычно имеет порядок от 20 до 200 мкмкф.

Посмотрим, как ведет себя усилитель на средних, низких и высоких частотах.

Для средних частот сопротивление емкости  $C_{cv}$  мало, и им можно пренебречь, а сопротивление емкости  $C_{ex}$  настолько велико, что его можно не учитывать. Тогда эквивалентная схема будет иметь вид, изображенный на фиг. 6,б.

В такой схеме генератор (лампа) работает на делитель напряжения, состоящий из активных сопротивлений  $R_i$  и  $R'_a$ , причем

$$R'_a = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_c}.$$

Поскольку в этом делителе сопротивления плеч не зависят от частоты сигнала, то и напряжение  $U_{вых}$  также не зависит от частоты, т. е. частотная характеристика в области средних частот представляет собой горизонтальную прямую линию.

На высоких частотах действием емкости  $C_{cv}$  усилительного каскада тоже можно пренебречь, но не учитывать влияния сопротивления емкости  $C_{ex}$  при этом нельзя; поэтому эквивалентная схема усилительного каскада для высоких звуковых частот принимает вид, изображенный на фиг. 6,в.

В этом случае генератор работает на делитель напряжения, нижнее плечо которого  $R'_a$  шунтировано емкостью  $C_{вх}$ . Чем выше частота, тем меньше емкостное сопротивление в нижнем плече делителя; следовательно, тем меньше будет  $U_{вх}$ . Характеристика усилителя на высоких частотах будет иметь завал и тем больше, чем выше частота.

Нужно заметить, что завал частотной характеристики на высоких частотах будет тем меньше, чем меньше емкость  $C_{вх}$  и чем меньше  $R'_a$ . Отсюда следует, что для уменьшения частотных искажений на высоких частотах следует брать сопротивление анодной нагрузки по возможности небольшим (помня при этом, что с уменьшением  $R'_a$  уменьшается коэффициент усиления усилителя на всех частотах) и стремиться к уменьшению  $C_{вх}$ .

На низких частотах сопротивлением емкости  $C_{св}$  пренебречь нельзя, но зато влияние  $C_{вх}$  не сказывается, и ее из эквивалентной схемы можно исключить.

Из эквивалентной схемы усилительного каскада на сопротивлениях для низких звуковых частот, изображенной на фиг. 6,2, видно, что напряжение  $U_{вых}$  снимается не с анодной нагрузки, а с делителя, шунтирующего анодную нагрузку. Этот делитель состоит из сопротивления утечки  $R_c$  в нижнем плече и конденсатора  $C_{св}$  — в верхнем. Напряжение  $U_{вых}$  снимается с нижнего плеча, в то время как сопротивление верхнего плеча зависит от частоты. Чем ниже частота, тем сопротивление емкости  $C_{св}$  переменному току выше. Увеличение сопротивления верхнего плеча делителя уменьшает выходное напряжение, т. е. вызывает завал частотной характеристики на низких частотах.

Уменьшить частотные искажения в области нижних частот можно или увеличением емкости  $C_{св}$  (в высококачественных усилителях величину  $C_{св}$  берут равной  $0,05 \div 0,1$  мкф), или увеличением сопротивления  $R_c$ . В высококачественных усилителях практическим пределом величины  $R_c$  является сопротивление порядка  $1\text{—}2$  мгом.

Приводим сводку расчетных формул, позволяющих определить коэффициент усиления каскада на средних частотах, а также коэффициент частотных искажений на высоких и низких частотах.

1. Коэффициент усиления каскада на средних частотах  $K_0$  определяется по формуле

$$K_0 = \frac{\mu R'_a}{R_i + R'_a},$$

где  $\mu$  — коэффициент усиления лампы;

$R'_a = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_c}$  — полное сопротивление анодной нагрузки, *ом*;

$R_a$  — сопротивление анодной нагрузки, *ом*;

$R_c$  — сопротивление утечки сетки лампы следующего каскада, *ом*;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы, *ом*.

2. Коэффициент частотных искажений на высоких частотах  $M_\theta$  равен отношению коэффициента усиления каскада на высоких частотах  $K_\theta$  к коэффициенту усиления на средних частотах  $K_0$ :

$$M_\theta = \frac{K_\theta}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (6,28 F_\theta C_{\theta x} R'_i)^2}},$$

где  $F_\theta$  — частота, для которой определяется коэффициент частотных искажений, *гц*;

$C_{\theta x}$  — входная емкость, определенная по ранее приведенной формуле (стр. 21), *ф*;

$$R'_i = \frac{R_i}{1 + \frac{R_i}{R_a} + \frac{R_i}{R_c}}.$$

3. Коэффициент частотных искажений на низких частотах  $M_n$  равен отношению коэффициента усиления каскада на низких частотах  $K_n$  к коэффициенту усиления на средних частотах  $K_0$ :

$$M_n = \frac{K_n}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{6,28 F_n C_{cb} R_c} \right)^2}},$$

где  $F_n$  — частота в области низких частот, для которой определяется коэффициент частотных искажений, *гц*;

$C_{cb}$  — емкость конденсатора связи, *ф*;

$R_c$  — сопротивление утечки сетки лампы следующего каскада, *ом*,

4. Если заданными величинами являются  $M_6$ ,  $F_6$ ,  $C_{6x}$  и  $R_i$ , то величину  $R'_i$  можно определить по формуле

$$R'_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{M_6^2} - 1}}{6,28 F_6 C_{6x}},$$

а по заданному  $R_i$  и  $R_c$  — величину сопротивления анодной нагрузки  $R_a$ :

$$R_a = \frac{R'_i}{1 - \frac{R'_i}{R_i} - \frac{R'_i}{R_c}}.$$

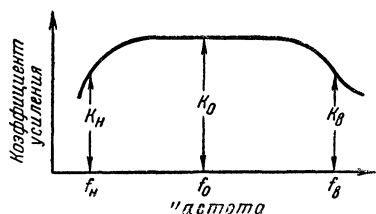
5. Емкость конденсатора  $C_{cв}$  определяется по формуле

$$C_{cв} = \frac{1}{6,28 F_n R_c \sqrt{\frac{1}{M_n^2} - 1}}.$$

В трех последних формулах все величины выражены в тех же единицах, что и в предыдущих.

Типичная частотная характеристика усилителя на сопротивлениях изображена на фиг. 7.

Еще одним источником завала характеристики на низких звуковых частотах является емкость, шунтирующая сопротивление смещения в катоде лампы.



Фиг. 7. Типичная частотная характеристика усилительного каскада на сопротивлениях.

Если эта емкость взята недостаточно большой, то на самых низких частотах диапазона сопротивление конденсатора будет значительным, и на катодном сопротивлении будет создаваться переменное напряжение, которое, являясь напряжением отрицательной обратной связи (с катода

на сетку лампы), уменьшит усиление на низких частотах. Для того чтобы избежать ослабления на низких частотах, нужно емкость блокировочного конденсатора брать достаточно большой. Обычно бывает совершенно достаточно емкость порядка 25—50 мкф.

Сопротивление смещения можно совсем не шунтировать конденсатором; тогда отрицательная обратная связь будет равномерной на всех частотах, что приведет лишь к одинаковому уменьшению усиления на всех частотах и к уменьшению нелинейных искажений. Уменьшение нелинейных искажений происходит в этом случае благодаря действию отрицательной обратной связи. Применение в катодной цепи сопротивлений, не шунтированных емкостью, можно рекомендовать всегда, когда не ставится задача получения от каскада наибольшего усиления.

Задачей предварительного усилителя низкой частоты является усиление входного напряжения до величины, достаточной для раскачки оконечного каскада.

В зависимости от того, какая лампа применена в оконечном каскаде усилителя, напряжение на ее сетке, соответствующее условию получения нормальной выходной мощности, может колебаться от 15 до 30 в. Применение триодов с большим коэффициентом усиления или пентодов в усилителе напряжения позволяет обычно обойтись одним каскадом в таком усилителе, если напряжение на вход его подается от детектора радиоприемника или граммофонного звукоснимателя.

Однако, в большинстве сложных высококачественных усилителей число каскадов бывает больше. Объясняется это тем, что почти ни один высококачественный усилитель в настоящее время не обходится без применения глубокой отрицательной обратной связи, сильно снижающей общий коэффициент усиления усилителя. В этом случае для компенсации ослабляющего действия отрицательной обратной связи число каскадов необходимо увеличивать.

С другой стороны, увеличение числа каскадов делается для того, чтобы еще более повысить чувствительность усилителя и тем самым расширить область применения его.

Необходимо заметить, что частотные искажения в многокаскадном усилителе больше, чем в однокаскадном. Поэтому чем больше каскадов в усилителе, тем более высокие требования нужно предъявлять к каждому из них в отношении частотных искажений.

Частотную характеристику многокаскадного усилителя построить легко, зная коэффициент  $M_1$  частотных искажений каждого его каскада. Если этот коэффициент выражен в виде отношения коэффициента  $K_0$  усиления усилителя на средних частотах к коэффициенту  $K_{\omega 1}$  усиления на интере-

сующей нас частоте ( $M_1 = \frac{K_0}{K_{f1}}$ ), то общий коэффициент частотных искажений равен произведению соответствующих коэффициентов каждого каскада. Так, например, в трехкаскадном усилителе коэффициент частотных искажений  $M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$ . Поэтому, зная допустимые искажения всего усилителя, нетрудно найти допустимый коэффициент частотных искажений для каждого его каскада.

В том случае, когда частотные искажения выражаются в децибелах, общий коэффициент частотных искажений равен сумме децибелов, характеризующих искажение в каждом каскаде.

Для уменьшения частотных искажений нужно придерживаться следующих правил:

1. Для уменьшения искажений на низких звуковых частотах произведение переходной емкости  $C_{св}$  на сопротивление  $R_c$  следующего каскада надо выбирать порядка 0,01—0,02 (имеется в виду, что  $C_{св}$  выражается в фарадах, а  $R_c$  — в омах, или  $C_{св}$  — в микрофарадах, а  $R_c$  — в мегомах).

Например, при  $R_c = 0,47 \text{ мгом}$   $C_{св} = \frac{0,02}{0,47} \approx 0,043 \text{ мкф}$  (0,05 мкф) или при  $R_c = 0,1 \text{ мгом}$   $C_{св} = \frac{0,01}{0,1} = 0,1 \text{ мкф}$ .

2. Емкость, шунтирующую сопротивление смещения в катode лампы, следует брать по возможности большой (25—50 мкф) или лучше совсем ее не ставить в том случае, когда нет необходимости получения от каскада максимального усиления.

3. Для снижения искажений на высоких частотах надо уменьшить входную емкость следующего каскада. Для этого необходимо аккуратно выполнять монтаж, сокращая длину соединительных проводов до минимума, а также выбирать лампы с минимальными междуэлектродными емкостями.

До сих пор мы рассматривали усилитель только с точки зрения получения от него наиболее прямолинейной частотной характеристики. Однако частотная характеристика современного высококачественного усилителя низкой частоты, предназначенного для усиления напряжения после детектора приемника, для звукозаписи и ее воспроизведения, а также для работы от микрофона, не всегда должна быть прямолинейной.



Усилитель напряжения, как уже было сказано, является только частью сложной цепи воспроизведения или записи звука. Отдельные же звенья этой цепи часто являются источником значительных частотных искажений.

Так, например, при приеме передачи радиовещательных станций мы сталкиваемся с ухудшением воспроизведения высоких частот. Это объясняется применением в приемнике настроенных резонансных контуров, ослабляющих крайние боковые частоты модуляции, соответствующие высоким частотам передаваемого материала.

В граммпзаписи, как правило, низкие частоты заваливаются, что объясняется необходимостью избежать сильных нелинейных искажений, а также для того, чтобы удлинить запись. Электромагнитные граммофонные звукосниматели имеют уменьшение отдачи на низких и высоких частотах. Для воспроизведения старых, много раз проигранных пластинок требуется уменьшение усиления на высоких частотах, для того чтобы уменьшить шипение иглы. Громкоговоритель, заключенный в ящик, имеющий небольшие размеры, плохо воспроизводит низкие частоты.

Кроме необходимости компенсации искажений, вносимых различными звеньями цепи воспроизведения звука, есть еще и другие факторы, требующие регулирования частотной характеристики.

Одним из таких факторов является особенность чувствительности человеческого уха к звуковым колебаниям при разных уровнях громкости. Эта особенность заключается в том, что при больших громкостях ухо воспринимает все частоты равномерно. Но стоит только значительно снизить громкость, как передача будет казаться лишенной самых низких и самых высоких частот. Тембр ее становится бедным, лишенным художественности.

Желательно, чтобы при уменьшении громкости усилитель автоматически поднимал усиление на низких и высоких частотах в определенной закономерности, но такое устройство усложняет усилитель и применяется сравнительно редко. В большинстве же случаев такое регулирование производится вручную, одновременно с регулированием громкости, но для этого частотная характеристика усилителя должна регулироваться по низким и высоким частотам.

Еще одним фактором, делающим желательным регулирование частотной характеристики в усилителе, являются особенности акустики тех помещений, в которых работает радиоустановка. Комната, где установлен громкоговоритель,

может иметь самые различные размеры, а следовательно, и различные объемы заключенного в ней воздуха. В комнате с большим объемом воздуха будут лучше воспроизводиться низкие частоты. В некоторых случаях появляются неприятные для слуха резонансы на низких частотах, речь становится неразборчивой, бубнящей.

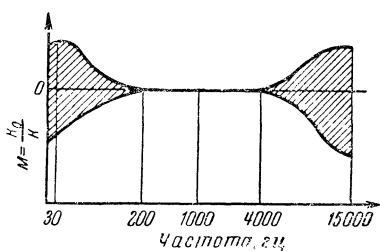
Наконец, в комнате могут находиться различные предметы (мягкая мебель, ковры), которые поглощают звук и делают передачу приглушенной. И в этом случае, для того чтобы приспособить звучание громкоговорителя к индивидуальным особенностям помещения, сделать звучание наиболее приятным для слуха и удовлетворить индивидуальным вкусам слушателя, необходимо регулирование частотной характеристики в усилителе.

Различные методы регулирования частотной характеристики рассматриваются в следующем параграфе, а частотные искажения в оконечном каскаде усилителя будут рассмотрены в гл. 4.

## 2. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В УСИЛИТЕЛЕ

Выясним прежде всего, какой вид должна принимать частотная характеристика при регулировании.

Обычно встречается необходимость в раздельном регулировании усиления на крайних участках характеристики,



Фиг. 8. Частотная характеристика усилителя с раздельным регулированием низких и высоких частот.

т. е. на самых низких и на самых высоких частотах, с возможностью регулировать усиление на этих частотах так, чтобы оно было в одном крайнем положении регулятора выше усиления на средних частотах, а в другом — ниже. Желательно, чтобы при регулировании нижних и верхних частот усиление на средних частотах (порядка 1000 гц)

оставалось неизменным. На фиг. 8 изображен примерный вид частотной характеристики при среднем и крайних положениях регулятора. Заштрихованные области показывают, что в пределах их можно получить любую частотную характеристику путем раздельного регулирования двумя регуляторами.

Рассмотрим методы, применяемые для регулирования частотной характеристики, и возможные практические варианты схем.

**Схемы, дающие подъем усиления на высоких и низких частотах с сохранением усиления на средних частотах.** Обычно в этих схемах используется резонанс напряжений на частотах, подлежащих подчеркиванию.

На фиг. 9 приведена схема, дающая подъем усиления на высоких частотах. В цепь сетки включена корректирующая индуктивность  $L_{кв}$ .

Величина индуктивности  $L_{кв}$  выбирается из такого расчета, чтобы на нужной частоте  $f_k$  получался последовательный резонанс в цепи, образованной  $L_{кв}$  и входной емкостью следующей лампы  $C_{вх}$ .

При резонансе напряжение на емкости  $C_{вх}$ , а следовательно, и на сетке следующего каскада будет больше, чем на средних частотах, что обеспечивает некоторый подъем частотной характеристики на высоких частотах.

Зная величину  $C_{вх}$ , можно определить необходимую индуктивность  $L_{кв}$  по формуле

$$L_{кв} = \frac{1}{4\pi^2 f_k^2 C_{вх}},$$

где  $L_{кв}$  — индуктивность корректирующей катушки, гн;  $\pi = 3,14$ ;

$f_k$  — частота, на которой желательно иметь подъем, гц;

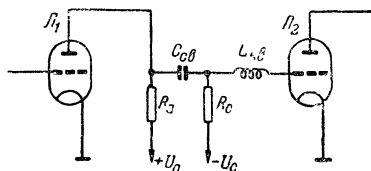
$C_{вх}$  — входная емкость следующего каскада усилителя, ф.

**Пример:** Найти величину  $L_{кв}$ , если

$$C_{вх} = 100 \text{ мкмкф} \text{ и } f_k = 10\,000 \text{ гц.}$$

$$L_{кв} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 10\,000^2 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 2,5 \text{ гн.}$$

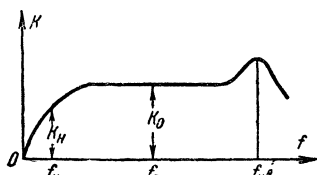
Влиянием корректирующей индуктивности на средних и низких звуковых частотах можно пренебречь; поэтому частотная характеристика в области низких и средних частот будет такой, как в обычном усилителе на сопротивлениях.



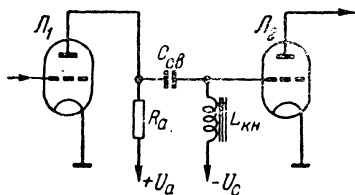
Фиг. 9. Схема коррекции частотной характеристики на высоких звуковых частотах, использующая резонанс напряжений.

Примерный вид частотной характеристики усилителя с коррекцией на высоких частотах по схеме фиг. 9 приведена на фиг. 10.

На фиг. 11 изображена схема для подъема частотной характеристики в области низких частот. В этой схеме вместо сопротивления утечки сетки лампы второго каскада включен дроссель  $L_{KH}$ . Индуктивность его выбирается такой, чтобы на желаемой частоте  $f_K$  получался резонанс напряжений



Фиг. 10. Частотная характеристика каскада с коррекцией, схема которого изображена на фиг. 9.



Фиг. 11. Схема коррекции частотной характеристики в области низких звуковых частот, использующая резонанс напряжений.

в цепи, образованной последовательным соединением переходной емкости  $C_{CB}$  и индуктивности  $L_{KH}$ . Индуктивность  $L_{KH}$  можно определить по формуле

$$L_{KH} = \frac{1}{4\pi^2 f_K^2 \cdot C_{CB}},$$

где  $L_{KH}$  — индуктивность корректирующего дросселя,  $гн$ ;  
 $f_K$  — частота, на которой желательно иметь подъем усиления;

$C_{CB}$  — емкость переходного конденсатора,  $ф$  ( $1 мкф = 10^{-6} ф$ ).

**Пример:** Желательно иметь подъем на частоте  $f_K = 40 гц$ . Найти величину  $L_{KH}$ , если  $C_{CB} = 0,05 мкф$ .

$$L_{KH} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 40^2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6}} \approx 317 гн.$$

Увеличивая емкость конденсатора  $C_{CB}$ , можно получить нужный результат при меньшем значении  $L_{KH}$ .

На фиг. 12 приведен примерный вид частотной характеристики для схемы фиг. 11.

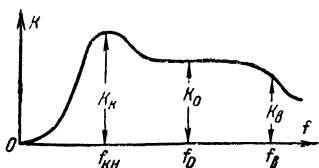
Возможно совмещение схем, изображенных на фиг. 9 и 11, с целью получения от них одновременного подъема на низких и высоких частотах.

Применяя шунтирование корректирующих индуктивностей переменным сопротивлением, можно регулировать степень подъема частотной характеристики как в области низких, так и в области высоких частот, правда частота коррекции будет при этом смещаться по диапазону.

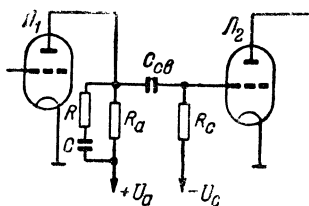
Недостатком рассмотренных схем является необходимость применения в них больших индуктивностей, удорожающих усилитель.

Кроме того, вокруг таких корректирующих индуктивностей всегда будут возникать магнитные поля, создающие опасность самовозбуждения усилителя. На корректирующих катушках легко могут появиться различного вида наводки, фон переменного тока и т. п. Благодаря этим недостаткам рассмотренные нами схемы в настоящее время почти не применяются в высококачественных усилителях низкой частоты.

**Схемы коррекции, основанные на уменьшении усиления на средних частотах.** Ранее рассмотренные нами схемы позволяют получить подъем на высоких и низких частотах без уменьшения усиления на средних частотах.



Фиг. 12. Частотная характеристика каскада с коррекцией, схема которого изображена на фиг. 11.

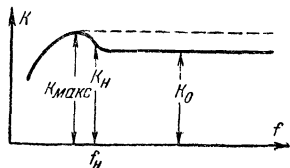


Фиг. 13. Схема корректирующего каскада с цепью  $RC$ , создающая подъем характеристики в области низших частот.

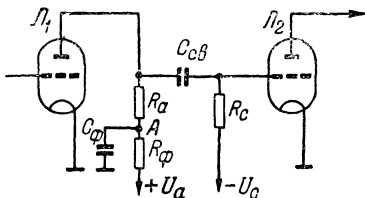
На фиг. 13 изображена схема корректирующего каскада, дающего возможность получить относительный подъем частотной характеристики в области низших частот за счет уменьшения усиления на средних и высших частотах. Сопротивление анодной нагрузки  $R_a$  лампы  $L_1$  шунтировано корректирующей цепью, содержащей  $R$  и  $C$ . Емкость конденсатора  $C$  выбирается такой величины, чтобы его сопротивление переменному току начинало сказываться только на наиболее низких частотах, подлежащих коррекции. На

средних и высоких частотах сопротивлением емкости переменному току можно пренебречь. Тогда сопротивление анодной нагрузки  $R_a$  оказывается шунтированным сопротивлением  $R$ , что вызывает уменьшение усиления на этих частотах.

На низших частотах сопротивление конденсатора сильно возрастает и для какой-то частоты станет настолько большим, что шунтирующим действием цепи  $RC$  можно пре-



Фиг. 14. Частотная характеристика каскада с коррекцией, схема которого изображена на фиг. 13.



Фиг. 15. Схема корректирующего каскада с применением фильтра в анодной цепи для подъема усиления в области низших частот.

небречь. Коэффициент усиления будет при этом возрастать и приближаться к тому значению, которое определяется только сопротивлением нагрузки  $R_a$ .

Чем меньше сопротивление  $R$ , тем меньше будет коэффициент усиления на средних и высоких частотах, но тем больше будет относительный подъем на низких частотах. Чем больше емкость  $C$ , тем левее будет область подъема на частотной характеристике. Частотная характеристика каскада, собранного по схеме фиг. 13, изображена на фиг. 14. Пунктиром показана частотная характеристика каскада при отключенной цепи  $RC$ .

На фиг. 15 приведена другая схема коррекции низких частот, использующая тот же принцип. Как видно из схемы, она представляет собой обычный развязывающий фильтр в цепи анода.

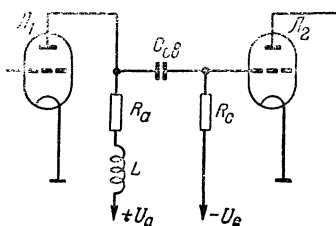
Разница между этими схемами заключается лишь в том что в схеме фиг. 13 сопротивление корректирующей цепи включено параллельно анодной нагрузке, а в схеме фиг. 15 сопротивление  $R_\phi$  включено последовательно с анодной нагрузкой. В первой схеме конденсатор цепи коррекции  $C$  был включен последовательно с сопротивлением  $R$ , а во второй конденсатор  $C_\phi$  шунтирует сопротивление  $R_\phi$ . Рассмотрим работу последней схемы.

На средних и высших частотах сопротивлением конденсатора  $C_\phi$  переменному току можно пренебречь; это значит, что по переменному току потенциал точки А (фиг. 15) будет равен потенциалу земли и коэффициент усиления каскада будет определяться сопротивлением анодной нагрузки  $R_a$  и сопротивлением утечки сетки следующего каскада  $R_c$ . На более низких частотах начинает сказываться сопротивление емкости  $C_\phi$ . На какой-то достаточно низкой частоте это сопротивление станет настолько большим, что шунтирующим действием конденсатора  $C_\phi$  можно пренебречь. Тогда усиление каскада будет определяться измененной величиной анодной нагрузки. Последовательно с сопротивлением  $R_a$  окажется включенным сопротивление  $R_\phi$  так, что измененная величина анодной нагрузки окажется равной  $R'_a = R_a + R_\phi$ . Благодаря этому коэффициент усиления на низких звуковых частотах возрастет и тем больше, чем больше величина  $R_\phi$ .

Частотная характеристика такой схемы не отличается от частотной характеристики предыдущей схемы, но в этом случае величина  $R_\phi$  сказывается иначе, а именно при увеличении  $R_\phi$  улучшается коррекция. Увеличение сопротивления  $R_\phi$  ограничено тем, что оно поглощает значительную часть анодного напряжения лампы и не может быть взято слишком большим. Влияние изменения величины  $C_\phi$  такое же, как для схемы фиг. 13.

**Схемы для подъема частотной характеристики в области высших частот.** На фиг. 16 приведена схема усилительного каскада, отличающаяся от обычной схемы на сопротивлениях только тем, что последовательно с сопротивлением анодной нагрузки  $R_a$  включена индуктивность.

Величина индуктивности  $L$  выбирается такой, чтобы ее сопротивление переменному току на средних и низших частотах было настолько малым, чтобы им можно было пренебречь. Тогда усиление на низших и средних частотах будет определяться только сопротивлением анодной нагрузки  $R'_a$ . На более высоких частотах начинает сказываться со-

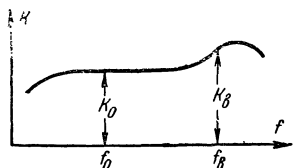


Фиг. 16. Схема с индуктивностью в аноде для подъема усиления в области высших частот.

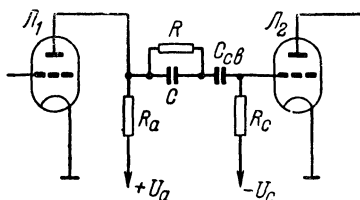
противление индуктивности переменному току. Это сопротивление будет тем больше, чем больше частота. Увеличение индуктивного сопротивления скажется как некоторое увеличение анодной нагрузки, что приведет к подъему усиления на высших частотах.

Подъем усиления при повышении частоты не будет продолжаться беспредельно. При какой-то частоте начнет сильно сказываться шунтирующее действие входной емкости лампы  $\mathcal{L}_2$ , и усиление начнет уменьшаться (фиг. 17).

Применение в схеме фиг. 16 индуктивности является ее недостатком, так как это удорожает усилитель. Обычно кор-



Фиг. 17. Частотная характеристика каскада с индуктивностью в анодной цепи.



Фиг. 18. Схема с контуром  $RC$  в качестве корректирующей цепи для подъема усиления в области высших частот.

ректирующие индуктивности в анодной цепи низкочастотных усилителей не применяются и используются только в широкополосных усилителях, предназначенных для усиления видеосигналов в телевизорах и осциллографах.

На фиг. 18 изображена схема коррекции в области высших частот без применения индуктивности. Последовательно с конденсатором связи  $C_{св}$  включена цепь, состоящая из параллельно включенных конденсатора  $C$  и сопротивления  $R$ .

Цепь  $RC$  и конденсатор  $C_{св}$  образуют верхнее плечо, а сопротивление  $R_c$  — нижнее плечо делителя напряжения. Емкость конденсатора  $C$  выбирается такой, чтобы его сопротивление переменному току на низших и средних частотах было велико, и на этих частотах сопротивление цепи определяется исключительно сопротивлением  $R$ .

С повышением частоты сопротивление конденсатора переменному току падает, и для какой-то частоты оно будет настолько малым, что им можно пренебречь. Это значит, что с повышением частоты сопротивление верхнего плеча делителя уменьшается, вызывая увеличение напряжения на сетке лампы  $\mathcal{L}_2$ , т. е. частотная характеристика будет иметь подъем на высших частотах. Этот подъем ограничивается

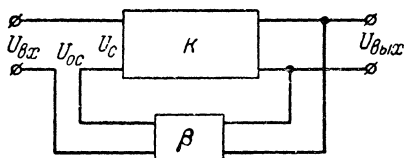


теми частотами, на которых начинает сильно сказываться входная емкость лампы  $L_2$ . При дальнейшем повышении частоты коэффициент усиления начинает падать.

Частотная характеристика этой схемы в основном подобна частотной характеристике схемы, изображенной на фиг. 16. Достоинством схемы является отсутствие индуктивности, недостатком — уменьшение коэффициента усиления на средних и низших частотах.

**Схемы регулирования частотной характеристики с использованием отрицательной обратной связи.** В настоящее время чрезвычайно широкое распространение получили схемы тонкоррекции, использующие отрицательную обратную связь, степень которой меняется с частотой по определенному закону.

Прежде чем рассматривать эти схемы, вспомним принцип отрицательной обратной связи. Если с выхода какого-то усилителя подать часть напряжения на вход его, то такой усилитель будет являться усилителем с обратной связью.



Фиг. 19. Скелетная схема усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению.

В том случае, если напряжение обратной связи совпадает по фазе со входным напряжением, обратная связь называется положительной; при этом происходит увеличение коэффициента усиления усилителя и может появиться самовозбуждение его. Положительная связь в усилителях является нежелательным явлением, приводящим к неустойчивой работе усилителя и увеличивающим частотные и нелинейные искажения.

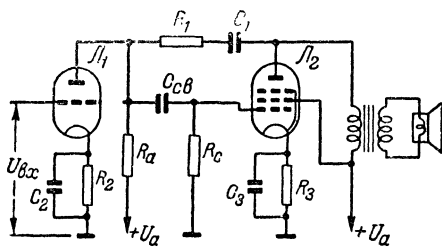
Если напряжение с выхода усилителя подается на вход его с фазой, противоположной входному напряжению, то такая обратная связь называется отрицательной.

Отрицательная обратная связь значительно улучшает свойства усилителя низкой частоты; при введении ее уменьшаются частотные, фазовые и нелинейные искажения, уменьшается фон переменного тока. При правильно рассчитанной обратной связи повышается стабильность работы усилителя. На фиг. 19 изображена скелетная схема усилителя с отрицательной обратной связью.

На сетку лампы первого каскада усилителя, имеющего коэффициент усиления  $K$ , поступает напряжение  $U_c$ . Это напряжение состоит из двух напряжений: входного напря-

жения  $U_{вх}$  и ослабляющего его напряжения отрицательной обратной связи  $U_{ос}$ . Напряжение  $U_{ос}$  является частью выходного напряжения  $U_{вых}$ . Отношение напряжения обратной связи к выходному напряжению  $\frac{U_{ос}}{U_{вых}}$  называется коэффициентом обратной связи и обозначается греческой буквой  $\beta$  (бета).

Деление выходного напряжения в  $\beta$  раз происходит в цепи обратной связи, которую мы на схеме также обозначим



Фиг. 20. Схема двухкаскадного усилителя с отрицательной обратной связью с анода лампы оконечного каскада на ее сетку.

буквой  $\beta$ . Чем больше величина  $\beta$ , тем больше отрицательная обратная связь и тем меньшее усиление будет давать усилитель. Наибольшим значением  $\beta$  может быть единица. Это значит, что при  $\beta=1$  все выходное напряжение (100%) подается на вход усилителя. Усилитель с отрицательной обратной связью, равной еди-

нице, или, как его чаще называют, усилитель со 100-процентной обратной связью, имеет коэффициент усиления меньше единицы, т. е. его выходное напряжение меньше, чем напряжение на входе усилителя. При  $\beta=0$ , т. е. при отсутствии обратной связи, усилитель дает обычный для него коэффициент усиления  $K$ .

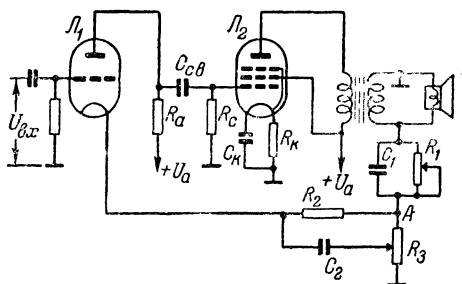
Влияние обратной связи на частотные, фазовые и нелинейные искажения будет рассмотрено более подробно в гл. 3; теперь же вернемся к вопросу получения тонкоррекции при помощи отрицательной обратной связи. Итак, увеличивая коэффициент обратной связи, мы уменьшаем усиление. Если цепь обратной связи выполнена так, что величина  $\beta$  не зависит от частоты, усилитель будет давать равномерное усиление в обычном для него диапазоне частот. Такую цепь легко осуществить, если выходное напряжение  $U_{ос}$  снимать с делителя, состоящего из простых активных сопротивлений.

Если же видоизменить цепь подачи обратной связи так, что с ее выхода будет получаться напряжение отрицательной обратной связи, зависящее от частоты, скажем увеличивающееся или уменьшающееся с частотой, то, подавая

такое напряжение на вход усилителя, мы будем изменять его усиление по нужному нам закону.

Существует большое количество различных схем тонкоррекции при помощи отрицательной обратной связи. На фиг. 20 приведена чрезвычайно распространенная схема двухкаскадного усилителя с отрицательной обратной связью от анода лампы оконечного каскада на ее сетку.

Обычно величина конденсатора  $C_1$  в цепи обратной связи и величины конденсаторов  $C_2$  и  $C_3$ , шунтирующих катодные сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ , выбираются такими, чтобы обеспе-



Фиг. 21. Схема двухкаскадного усилителя с плавно регулируемой отрицательной обратной связью.

чить равномерность усиления во всем диапазоне частот. Однако, если емкость  $C_1$  выбрать такой, чтобы сопротивление конденсатора переменному току на средних и высших частотах диапазона было малым, а на самых низких — значительным, то мы получим ослабление обратной связи для низких частот, а следовательно, подъем усиления для этих частот.

Как уже говорилось ранее, конденсаторы, шунтирующие сопротивления смещения, являются также источником частотных искажений на низких частотах, благодаря чему их величина выбирается достаточно большой или они совсем не применяются. Если шунтировать сопротивления смещения конденсаторами, сопротивление переменному току которых будет большим на низких и средних частотах, но достаточно малым для наивысших частот диапазона, то мы получим вторую частотно-избирательную обратную связь. На самых высоких частотах диапазона обратная связь будет ослаблена, а коэффициент усиления увеличен. Применяя такую простую схему, можно создать подъем усиления на низших и высших частотах.

На фиг. 21 изображена другая, хорошо известная радиолюбителям схема плавного регулирования тона, использующая частотнозависимую отрицательную обратную связь.

Напряжение обратной связи снимается со вторичной обмотки выходного трансформатора и через делитель напряжения подается в катод лампы  $\mathcal{L}_1$ . Схема дает возможность получить плавно регулируемые подъем усиления на низших частотах, а также подъем и завал частотной характеристики на высших частотах.

Рассмотрим сначала действие схемы на низших частотах. Один конец вторичной обмотки выходного трансформатора соединен с землей. Напряжение, развиваемое на этой обмотке, приложено к делителю напряжения, состоящему из конденсатора  $C_1$ , переменного сопротивления  $R_1$  и потенциометра  $R_3$ . Конденсатор  $C_1$ , шунтированный сопротивлением  $R_1$ , является верхним плечом делителя напряжения, а потенциометр  $R_3$  — нижним плечом. Емкость  $C_1$  выбрана такой, чтобы сопротивление конденсатора переменному току на средних и высших частотах было незначительным по сравнению с сопротивлением  $R_3$ , а для низших частот было больше его. Таким образом, сопротивление верхнего плеча делителя увеличивается при понижении частоты, а напряжение отрицательной обратной связи, снимаемое в точке  $A$ , уменьшается. Отсюда это напряжение через сопротивление  $R_2$  подается на катод лампы  $\mathcal{L}_2$ . Уменьшение напряжения обратной связи с уменьшением частоты вызывает подъем усиления на низших частотах. Шунтирование конденсатора  $C_1$  сопротивлением  $R_1$  приводит к уменьшению подъема частотной характеристики на низших частотах. При уменьшении сопротивления  $R_1$  до нуля отрицательная обратная связь на низших и средних частотах станет одинаковой, и подъема в частотной характеристике не будет.

Для средних и высших частот сопротивлением конденсатора  $C_1$  можно пренебречь; следовательно, для этих частот все напряжение вторичной обмотки выходного трансформатора можно считать приложенным между верхним концом потенциометра  $R_3$  и землей. Емкость конденсатора  $C_2$  выбирается такой, чтобы его сопротивление на самых высших частотах диапазона было малым, а на средних и низших — большим.

При нижнем положении движка потенциометра  $R_3$  конденсатор  $C_2$  оказывается присоединенным одним концом к катоду лампы  $\mathcal{L}_1$ , а другим — к земле. Совершенно очевидно, что напряжение обратной связи будет теперь подаваться на

катод лампы  $L_1$  с делителя, нижним плечом которого является конденсатор  $C_2$ , а верхним — сопротивление  $R_2$ . Так как сопротивление конденсатора на высших частотах мало, а на самых высоких частотах может быть принято равным нулю, то и напряжение обратной связи на этих частотах будет ослаблено, что приведет к подъему их усиления.

При верхнем положении движка потенциометра  $R_3$  сопротивление  $R_2$  оказывается шунтированным емкостью  $C_2$ , поэтому напряжение обратной связи на высших частотах будет больше, чем на средних и низших. В частотной характеристике на высших частотах будет завал.

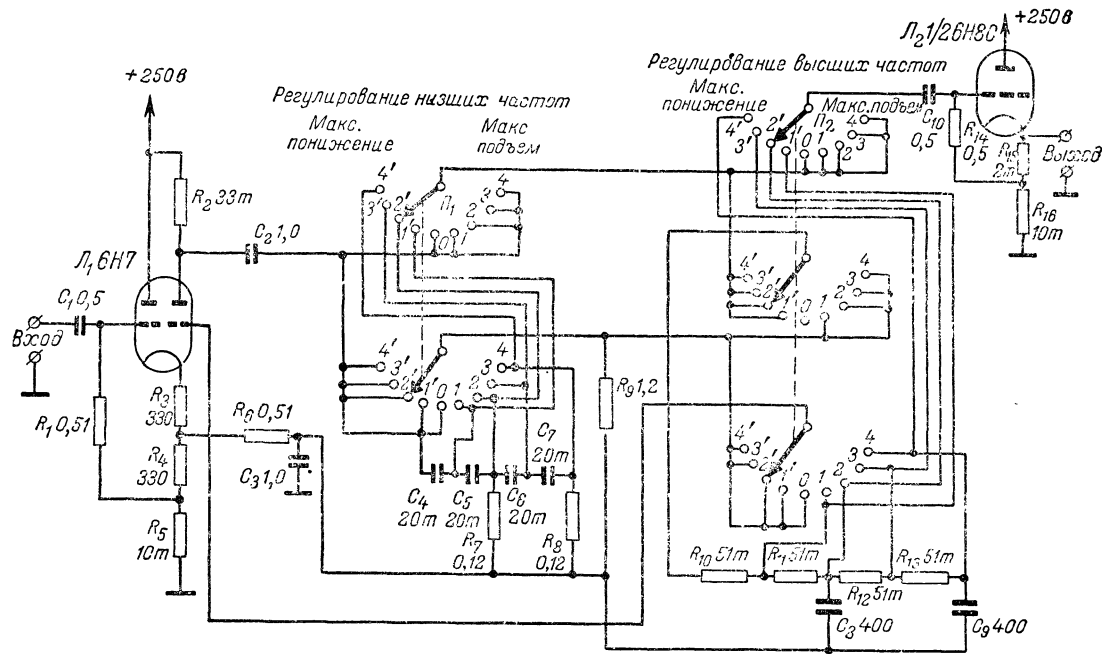
Перемещая движок потенциометра  $R_3$  из одного крайнего положения в другое, мы можем плавно изменять частотную характеристику усилителя на высших частотах.

Практические величины емкостей и сопротивлений для схемы фиг. 21 следующие:  $C_1$  — 1–2 мкф;  $C_2$  — 3 000 ÷ 5 000 мкмкф;  $R_1$  — 1 000–2 000 ом.  $R_2$  и  $R_3$  выбираются так, чтобы сумма их сопротивлений составляла величину, обеспечивающую нормальное смещение на сетку лампы  $L_2$ . Примерная величина  $R_3$  — порядка 250–300 ом.

Схема фиг. 21 была приведена в свое время на страницах журнала «Радио-фронт» в описании любительской радиолы. Работает она хорошо и может быть рекомендована для несложных усилителей.

На фиг. 22 приведена схема тонкорректирующего каскада, который может быть выполнен в виде самостоятельной приставки, подключаемой к любому усилителю. Схема дает возможность регулировать частотную характеристику в очень широких пределах, но не плавно, а скачками при помощи двух переключателей, один из которых служит для регулирования низших частот, а другой — высших. Для подъема усиления на этих частотах применена частотно зависящая отрицательная обратная связь. Для ослабления на крайних частотах используется последовательное включение частотно избирательных цепей.

На фиг. 23,а изображена скелетная схема такого устройства в случае применения его для ослабления усиления на краях диапазона. В этом случае усилитель работает с отрицательной обратной связью, не зависящей от частоты. Последовательно с выходом усилителя включена частотно избирательная цепь, ослабляющая крайние участки диапазона (или один из них).



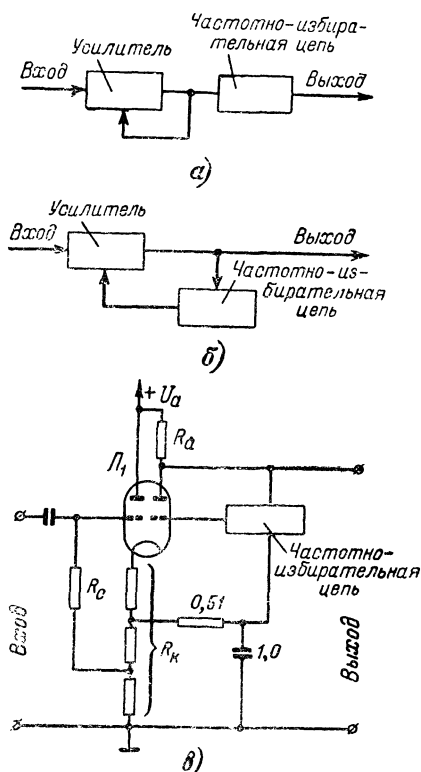
Фиг. 22. Принципиальная схема тонкорректирующего устройства с применением частотно-зависимой отрицательной обратной связи.

Допустимая мощность рассеяния для сопротивлений  $R_2$ ,  $R_6$  и  $R_{16}$  — 1 вт; для остальных — 0,25 вт.

На фиг. 23,б изображено то же устройство, но для случая подъема частотной характеристики на краях диапазона. Частотно избирательная цепь включена своими входными зажимами между анодом и катодом правой половины двойного триода  $\Pi_1$  (фиг. 23,в). Выходной зажим подключен к сетке правой половины лампы  $\Pi_1$ . Благодаря тому что частотно избирательная цепь дает напряжение на выходных зажимах, зависящее от частоты, напряжение отрицательной обратной связи на сетке правой половины лампы  $\Pi_1$  также зависит от частоты, что обеспечивает возможность регулирования частотной характеристики.

В качестве частотно избирательной цепи, регулирующей усиление на нижних частотах диапазона, использован так называемый фильтр нижних частот, схема которого изображена на фиг. 24,а.

Если на вход такого фильтра подать переменное напряжение, частота которого плавно меняется от нуля до наивысшей частоты диапазона, то напряжение на выходе фильтра будет сначала равно нулю (до некоторой частоты, которая зависит от величины  $C_1$  и  $R_1$ ), а затем начнет повышаться, и далее, после некоторой частоты и для всех частот, лежащих выше ее, напряжение на выходе фильтра будет оставаться практически постоянным. Использование такого фильтра в цепи отрицательной обратной связи позволяет получить подъем низших частот, почти не изменяя усиления на средних частотах.

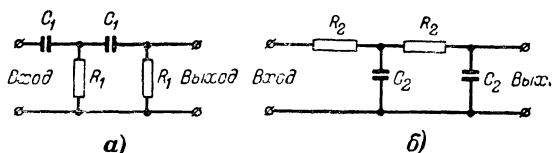


Фиг. 23. Скелетная схема тонкорректирующего устройства, изображенного на рис. 22.

а — для уменьшения усиления на краях диапазона; б — для подъема усиления на краях диапазона; в — упрощенная схема тонкорректирующего устройства.

Включение этого же фильтра последовательно с выходом усилителя дает сильное ослабление низших частот, также без заметного ослабления средних частот.

Для регулирования частотной характеристики на высших частотах применена другая частотно избирательная цепь, схема которой приведена на фиг. 24,б. Это так называемый фильтр верхних частот. Частотная характеристика его выходного напряжения линейна до некоторой частоты (зависящей от величин  $R_2$  и  $C_2$ ), после которой выходное напряжение падает и на какой-то частоте практически становится равным нулю. Использование фильтра верхних частот в цепи отрицательной обратной связи или последовательно с выходом усилителя позволяет получить подъем или ослабление усиления на высоких частотах без заметного влияния на усиление средних частот.



Фиг. 24. Схемы фильтров частотно избирательной цепи.

а — для низших частот, б — для высших частот.

Для получения одновременного подъема усиления на низших и высших частотах оба фильтра включаются последовательно и используются в цепи отрицательной обратной связи. Для одновременного ослабления этих частот оба фильтра также соединяются последовательно и включаются на выход усилителя. Для подъема одних частот и ослабления других соответствующие фильтры включаются так, что один из них используется в цепи обратной связи, а другой включается последовательно с выходом усилителя.

В упрощенной схеме корректирующего усилителя (фиг. 23,б) левая половина двойного триода  $\mathcal{L}_1$  является первым каскадом усилителя и собрана по схеме катодного повторителя. Его назначение — развязать напряжение входного сигнала от напряжения отрицательной обратной связи. Кроме того, катодный повторитель обеспечивает высокое входное сопротивление усилителя, что очень часто является весьма желательным (например, при работе корректирующего усилителя от высокоомного источника, такого, как пьезоэлектрический звукосниматель). Правая половина  $\mathcal{L}_1$  является собственно корректирующим каскадом.



В изображенной на фиг. 22 полной принципиальной схеме корректирующего усилителя для регулирования усиления низших частот используется сдвоенный галетный переключатель  $P_1$  на девять положений. При его помощи производятся соответствующие переключения частотно избирательной цепи, состоящей из четырех конденсаторов по 20 000 мкмкф и двух сопротивлений по 0,12 мгом. Среднее положение переключателя дает линейную горизонтальную частотную характеристику на низших частотах, а крайние положения — максимальный подъем и завал характеристики.

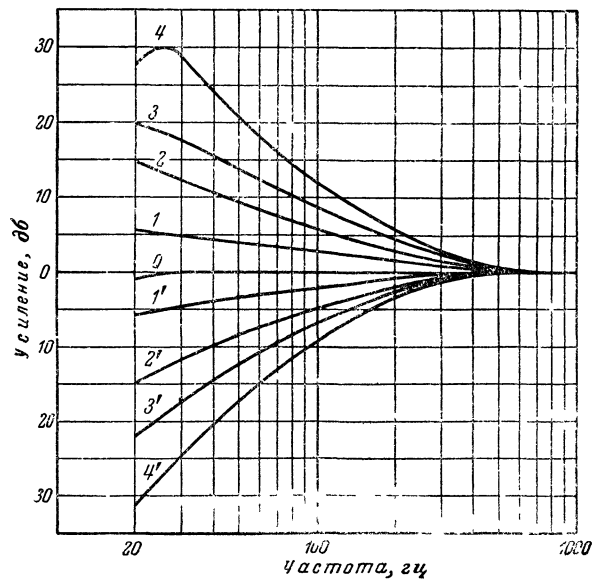
Такое же назначение и переключателя  $P_2$ . Он представляет собой строенный галетный переключатель на девять положений и производит необходимые переключения частотно избирательной цепи, служащей для регулирования усиления на высших частотах. При среднем положении переключателя  $P_2$  характеристика усилителя на высших частотах линейна и горизонтальна. Вращение его в одну сторону вызывает подъем высших частот, а вращение в противоположную сторону — ослабление их.

Оба переключателя действуют независимо друг от друга и почти не влияют на частотную характеристику в области средних частот.

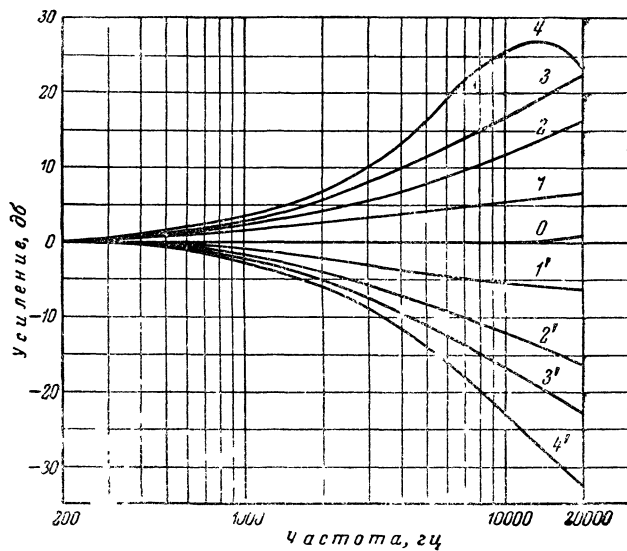
Чтобы иметь возможность соединять корректирующий усилитель с мощным усилителем кабелем (на некотором расстоянии друг от друга) без искажений частотной характеристики и различных наводок, выходной каскад корректирующего усилителя собран по схеме катодного повторителя (лампа  $L_2$ ). Катодный повторитель обеспечивает низкое выходное сопротивление, при котором влияние соединительного кабеля уменьшается.

В качестве лампы  $L_1$  можно взять двойной триод типа 6Н7, а в качестве  $L_2$  — любой триод с небольшим коэффициентом усиления.

На фиг. 25 и 26 приведены частотные характеристики усилителя для всех положений переключателей  $P_1$  и  $P_2$ , а на фиг. 27 — общие частотные характеристики усилителя при крайних положениях переключателей. Коэффициент усиления усилителя на средних частотах около 1. Максимальное напряжение, которое можно подавать на вход усилителя, — порядка 1,5—2 в. При этом напряжении он дает незначительные нелинейные искажения. При подъеме крайних частот отрицательная обратная связь уменьшается, и нелинейные искажения увеличиваются. Однако нужно учесть, что



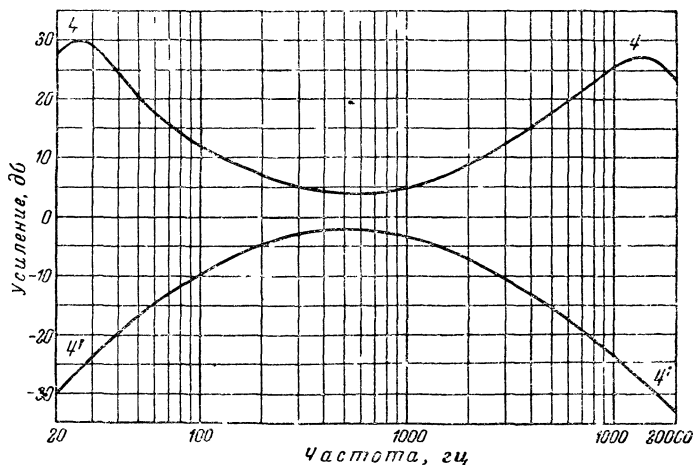
Фиг. 25. Частотные характеристики тонкорректирующего устройства, изображенного на фиг. 22, в области низших частот при различных положениях переключателя  $\Pi_1$  (переключатель  $\Pi_2$  — в среднем положении).



Фиг. 26. Частотные характеристики тонкорректирующего устройства, изображенного на фиг. 22, для области высших частот при различных положениях переключателя  $\Pi_2$  (переключатель  $\Pi_1$  — в среднем положении).

амплитуда крайних частот в обычном звуковом материале радиовещательных передач вообще значительно меньше, чем средних. Поэтому и искажения не будут заметными.

В случае невозможности применить переключатель на девять положений можно воспользоваться обычным переключателем на пять положений; тогда схема усилителя упростится, а число возможных комбинаций частотных характеристик уменьшится. В этом случае из схемы нужно исключить все соединения, идущие к контактам, обозначенным на схеме номерами 1, 1', 3 и 3', переключателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Это



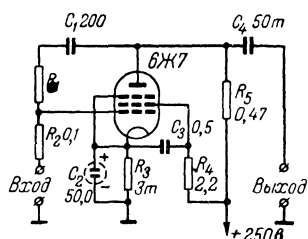
Фиг. 27. Частотные характеристики тонкорректирующего устройства, изображенного на фиг 22, для крайних положений переключателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ .

приведет к замене четырех конденсаторов по 20 000 мкмкф на два конденсатора по 10 000 мкмкф и четырех сопротивлений по 51 000 ом на два по 0,1 мгом. Для переключателя  $\Pi_1$  достаточно одной платы, имеющей пять положений и два направления, а для переключателя  $\Pi_2$  придется взять две платы (половина одной из них остается свободной).

Тонкорректирующий усилитель, собранный по схеме фиг. 22, работает очень хорошо, обеспечивая глубокое регулирование тона. Единственным недостатком его (наблюдающимся в том случае, если применяются обычные галетные переключатели) является то, что при переключении тона наблюдаются щелчки. Это объясняется тем, что при переходе ротора переключателя из одного положения в другое он некоторое время оказывается отключенным от контак-

тов переключателя, и усилитель в этот момент работает без отрицательной обратной связи, давая при этом наибольшее усиление. Для устранения такого недостатка желательно применение переключателей, у которых при переходе из одного положения в другое ротор замыкает соседние контакты.

**Тонкоррекция при воспроизведении грамзаписи.** По причинам, о которых говорилось ранее, при записи на граммо-



Фиг. 28. Принципиальная схема однолампового тонкорректирующего усилителя для коррекции частотной характеристики грамзаписи. Допустимая мощность рассеяния для сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  0,5—1 Вт, для остальных 0,25 Вт.

фонную пластинку в частотную характеристику усилителя, предназначенного для записи, преднамеренно вносятся искажения, которые выражаются в значительном (порядка 15—18 дБ) ослаблении низших и в подъеме высших частот. Если при воспроизведении грамзаписи через звукосниматель не учесть частотной характеристики пластинки, то звучание будет бедно низкими частотами при одновременном подчеркивании высоких частот.

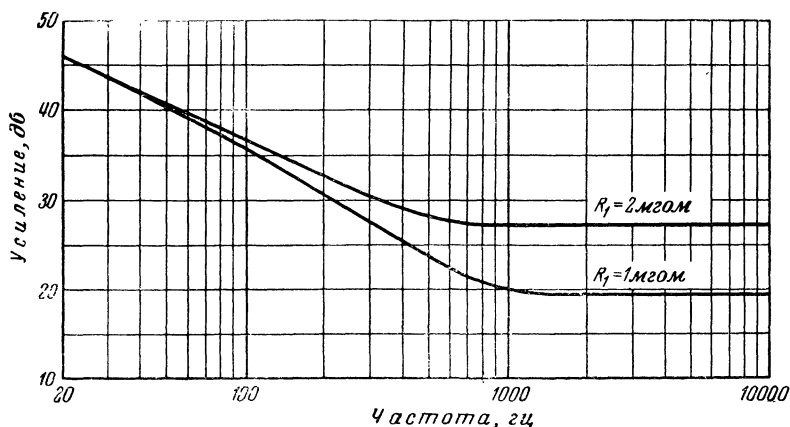
Существует ряд систем записи, отличающихся друг от друга нижней частотой, от которой начинается завал частотной характеристики. Некоторые системы не предусматривают подъема высших частот.

В настоящее время существует большое количество схем специальных граммофонных корректирующих усилителей. Некоторые из них дают возможность корректировать характеристику записи почти любой системы. В большинстве своем это довольно сложные устройства, не представляющие практического интереса для радиолюбителя.

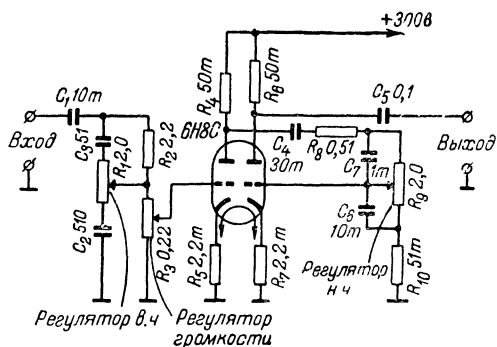
Описанный выше корректирующий усилитель (фиг. 22) довольно прост и дает возможность осуществлять эффективную коррекцию при воспроизведении грамзаписи как пьезоэлектрическим, так и электромагнитным звукоснимателем.

На фиг. 28 показана схема простого однолампового корректирующего усилителя, предназначенного для коррекции частотной характеристики грамзаписи при воспроизведении ее электромагнитным звукоснимателем, а на фиг. 29 приведена частотная характеристика этого усилителя для двух значений сопротивления  $R_1$ . Такой усилитель может

применяться в качестве предварительного усилителя при воспроизведении грамзаписи. Он дает усиление порядка 20—25 дБ в зависимости от величины сопротивления  $R_1$ .



Фиг. 29. Частотные характеристики тонкорректирующего усилителя, изображенного на фиг. 28, для двух значений сопротивления  $R_1$ .

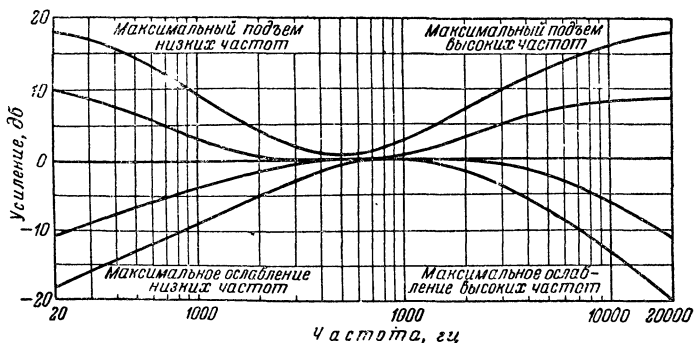


Фиг. 30. Принципиальная схема тонкорректирующего усилителя для регулирования частотной характеристики в области низших и высших звуковых частот.

Допустимая мощность рассеяния для сопротивлений  $R_4$  и  $R_6$  — 1 Вт; для остальных — 0,25 Вт.

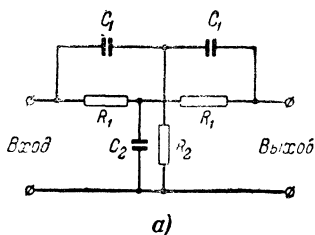
На фиг. 30 приведена еще одна, довольно простая схема тонкорректирующего усилителя, дающая возможность

плавно регулировать частотную характеристику на низших и высших частотах. В этой схеме регулирование осуществляется без применения отрицательной обратной связи. Уси-



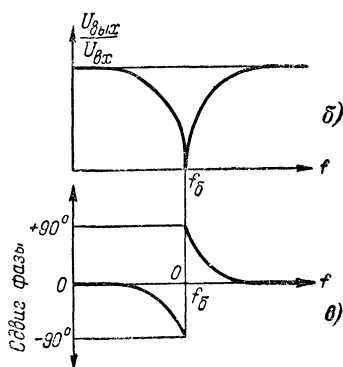
Фиг. 31. Частотные характеристики тонкорректирующего усилителя, схема которого приведена на фиг. 30.

литель пригоден для коррекции грамзаписи, а также и для регулирования тона при работе от радиоприемника. Частотные характеристики схемы приведены на фиг. 31.



Фиг. 32. Фильтр по схеме двойного моста Т.

а — схема фильтра; б — частотная характеристика фильтра; в — фазовая характеристика фильтра.



**Специальное применение частотно-избирательной обратной связи в усилителях.** На фиг. 32,а изображена схема так называемого двойного моста Т. Частотная характеристика такого фильтра напоминает перевернутую резонансную кривую колебательного контура (фиг. 32,б). Минимум выход-

ного напряжения получается на частоте, называемой частотой баланса ( $f_0$ ), определяемой по формуле

$$f_0 = \frac{1}{6,28 \cdot C_1 \cdot R_1},$$

где  $f_0$ —гц;  $C_1$ —ф;  $R_1$ —ом.

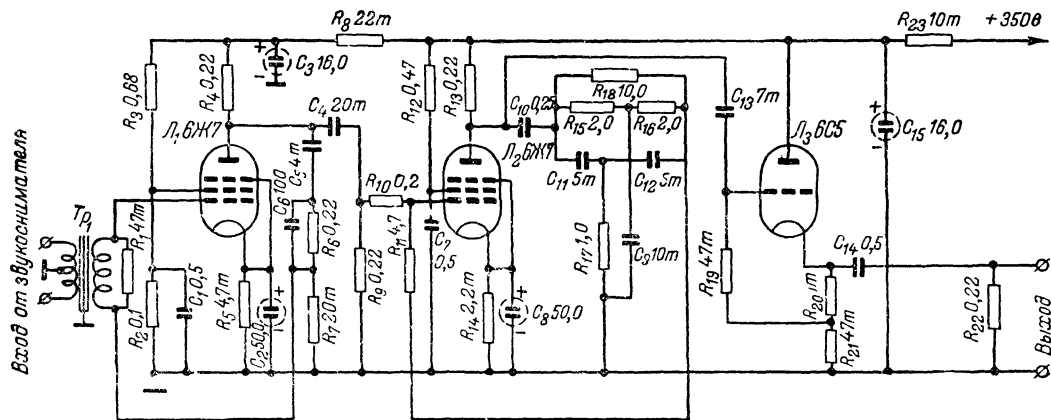
Между величинами  $R_1$  и  $R_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$  существует определенное соотношение. Обычно  $R_2 = 0,5 R_1$ , а  $C_2 = 2C_1$ .

Фазовая характеристика фильтра (она напоминает фазовую характеристику колебательного контура) приведена на фиг. 32,в. Вдали от частоты баланса фильтр не дает сдвига фаз между входным и выходным напряжениями. Вблизи частоты баланса (ниже ее) фазовый угол вначале увеличивается в сторону отрицательных значений, доходя до  $90^\circ$ , затем резко уменьшается, проходя через нуль на частоте баланса. На частотах выше частоты баланса фазовый угол становится положительным и также доходит до  $90^\circ$ , после чего уменьшается до нуля.

Если включить вход моста между анодом и катодом лампы усилителя, а напряжение с его выхода подавать на сетку этой же лампы, то это напряжение будет являться напряжением отрицательной обратной связи. Если выходное напряжение снимать на выходе моста, частотная характеристика усилителя будет иметь резкий подъем на частоте баланса. Острота полученной кривой будет тем больше, чем большее усиление дает лампа без обратной связи.

Применение мостовых фильтров подобного типа для подачи обратной связи в усилителях позволяет придать последним свойства резонансных усилителей без применения индуктивностей. Очень легко построить усилитель, частота баланса которого будет порядка 20—30 гц. Резонансный контур, содержащий индуктивность и емкость, на этих частотах был бы чрезвычайно громоздким и едва ли обладал бы достаточно острой резонансной кривой. В качестве примера применения мостовых фильтров в цепи обратной связи корректирующих усилителей рассмотрим две схемы.

На фиг. 33 представлена схема предварительного усилителя для коррекции частотной характеристики граммплаты. Схема обеспечивает сильный подъем низших частот вплоть до 20 гц, после чего характеристика резко падает до нуля. Практически частоты ниже 20 гц усилителем не пропускаются.



Фиг. 33. Принципиальная схема корректирующего усилителя для воспроизведения грам-записи, имеющего резкий спад характеристики ниже 20  $\text{гц}$ .

Мощность рассеяния для сопротивлений  $R_2, R_3, R_4, R_6, R_{12}, R_{13} - 0,5 \text{ вт}$ ; для  $R_{21}$  и  $R_{23} - 1 \text{ вт}$ ; для остальных  $- 0,25 \text{ вт}$ . Сопротивление  $R_1$  подбирают в зависимости от типа трансформатора  $T_1$ . Сопротивления  $R_{15}, R_{16}, R_{17}$  и конденсаторы  $C_{11}, C_{12}, C_9$  подбирают с точностью до 1% го отношению к их номинальным величинам



Это является ценным свойством усилителя, так как частоты ниже 20 *гц* обычно появляются на выходе звукоусилителя как результат вибраций электродвигателя, неровностей поверхностей пластины (вмятины, коробления) и прослушиваются на громкоговоритель как мешающий воспроизведению гул и стук. На частотах выше 20 *гц* при подключении на его вход хорошего электромагнитного звукоусилителя усилитель позволяет получить почти линейную частотную характеристику и имеет коэффициент усиления порядка 200—250.

Вход усилителя выполнен на трансформаторе, первичная обмотка которого имеет заземленную среднюю точку. К трансформатору предъявляются следующие конструктивные и электрические требования:

1. Минимальная индуктивность рассеяния и минимальная распределенная емкость вторичной обмотки, для чего нужно применить секционирование первичной и вторичной обмоток.

2. Возможно большая симметричность первичной обмотки относительно земли, для чего желательно применить электростатический экран между первичной и вторичной обмотками.

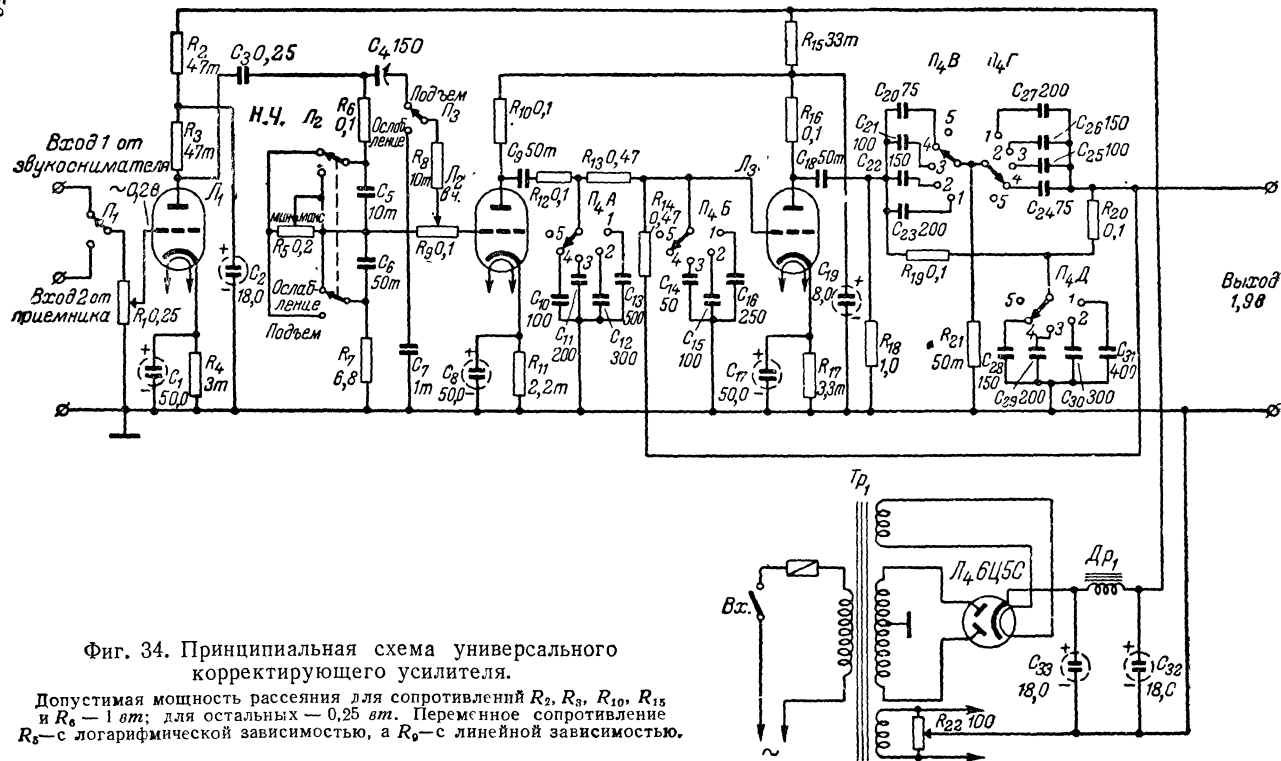
3. Коэффициент трансформации порядка 1:5 (трансформатор повышающий).

4. Индуктивность первичной обмотки  $L_1$  порядка 6 *гн*.

Такой вход дает возможность выполнять соединение усилителя с звукоуслителем при помощи двухжильного провода и делает проводку малочувствительной к наводкам. В качестве первой и второй ламп можно взять пентоды типа 6Ж7 или 6Ж8. В качестве выходной лампы, которая включена по схеме катодного повторителя, можно взять любой триод с низким коэффициентом усиления (6С5, 6С2С и т. п.).

На фиг. 34 приведена схема другого усилителя с использованием моста Т. Этот усилитель может быть использован в качестве универсального предварительного корректирующего усилителя для воспроизведения граммпзаписи, радиовещательного приема, звукозаписи и подобных целей.

Усилитель конструктивно выполнен в виде самостоятельного блока, имеющего свой маломощный выпрямитель. Применение самостоятельного выпрямителя избавляет усилитель от паразитных связей через источники питания с мощным усилителем.



Лампа  $L_1$  является тонкорректирующим каскадом, позволяющим осуществлять плавное регулирование частотной характеристики усилителя в широких пределах.

Потенциометры регулирования низших и верхних частот электрически объединены с двумя двухполюсными переключателями, которые переключают регуляторы тембра или на подъем, или на ослабление низших и высших частот.

Лампы  $L_2$  и  $L_3$  составляют усилитель с обратной связью через мост  $T$ ; схема рассчитана таким образом, что, переключая элементы моста, дополнительные фазосдвигающие емкости  $C_{14}$ ,  $C_{15}$  и  $C_{16}$  и шунтирующие анод лампы  $L_2$  емкости  $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{13}$ , можно получить крутой срез высоких частот.

Переключатели  $P_4$  —  $A$ ,  $B$ ,  $B$ ,  $\Gamma$  и  $D$  представляют собой обычного типа строчный галетный переключатель на пять положений и два направления. Установка переключателя в первое положение дает частоту среза 5 000 гц, во второе — 7 000 гц, в третье — 10 000 гц и в четвертое — 13 000 гц. В пятом положении фильтр выключается, обеспечивая линейную характеристику усилителя в диапазоне до 15 000—20 000 гц.

Возможность иметь резкий спад усиления на высоких частотах дает преимущества при приеме радиовещательных станций при наличии атмосферных и промышленных помех и при воспроизведении грамзаписи—для ослабления шума иглы.

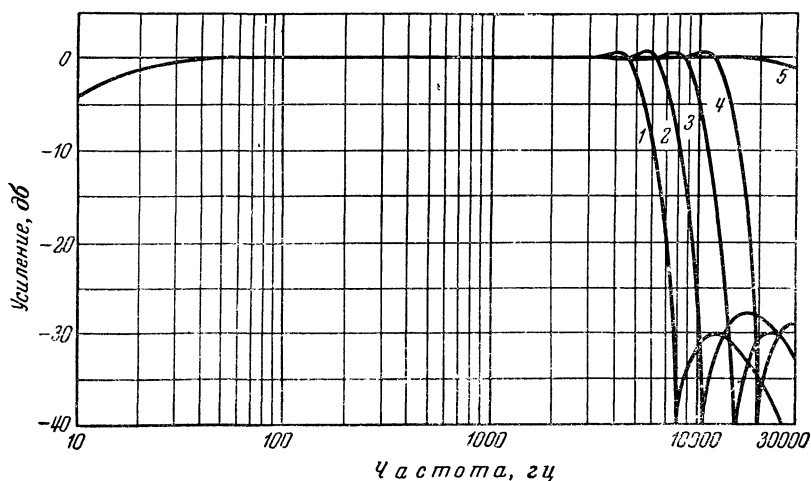
Усилитель имеет коэффициент усиления порядка 10 и вносит очень малые нелинейные искажения. В качестве ламп  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  можно взять триоды типа 6С2С или применить двойные триоды типа 6Н8С, объединив  $L_2$  и  $L_3$  в одном двойном триоде.

В выпрямителе применен маломощный кенотрон 6Ц5С. Силовой трансформатор должен быть рассчитан на напряжение вторичной обмотки 325 в на каждую половину при токе вторичной обмотки 20 ма. Две накальные обмотки должны давать напряжение по 6,3 в. Первая, для накала кенотрона, рассчитывается на ток 0,6 а, а вторая, для накала ламп усилителя,— на ток 1,5 а. Дроссель фильтра  $Dr$  должен иметь индуктивность порядка 50 гн и рассчитан на ток 20 ма. Сопротивление дросселя около 1 500 ом. Напряжение на выходе выпрямителя 350 в.

Для получения наилучших результатов, т. е. наиболее крутого среза частотной характеристики, емкости конденсаторов  $C_{20}$  и  $C_{24}$   $C_{21}$  и  $C_{25}$   $C_{22}$  и  $C_{25}$   $C_{23}$  и  $C_{27}$  должны быть

подобраны равными попарно с точностью до 1%. Конденсаторы  $C_{28}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{30}$  и  $C_{31}$  желательно также подобрать по возможности точнее. Емкость конденсаторов с  $C_{10}$  по  $C_{16}$  включительно можно взять с допуском 5%. Величины сопротивлений  $R_{19}$ ,  $R_{20}$  и  $R_{21}$  подбираются с точностью до 1%.

На фиг. 35 приведены частотные характеристики усилителя для различных положений переключателя  $\Pi_4$ . Кривые сняты при нулевом положении обоих тонкоректоров.



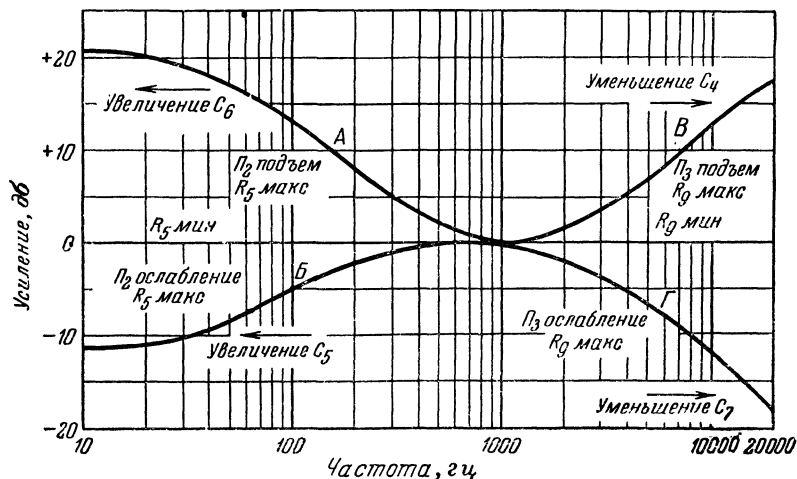
Фиг. 35. Частотные характеристики усилителя, изображенного на фиг. 34, при различных положениях переключателя  $\Pi_4$  и регуляторах  $R_5$  и  $R_9$  в нулевом положении.

Частотные характеристики для различных положений регуляторов тембра даны на фиг. 36.

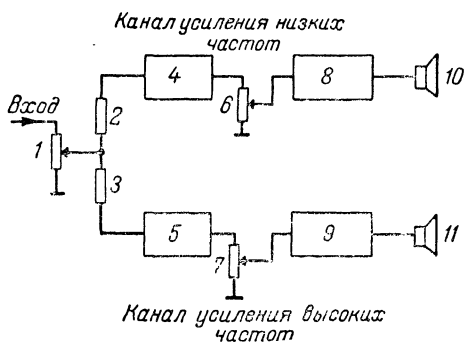
**Двухканальные усилители.** Рассмотрим принципиально новый метод регулирования частотной характеристики в усилителе, заключающийся в раздельном усилении отдельных участков диапазона звуковых частот. Скелетная схема такого усилителя, сравнительно несложного, приведена на фиг. 37 (принципиальная схема и описание усилителя даны в гл. 6).

Напряжение звуковой частоты на входе усилителя разделяется на два самостоятельных канала. Каждый канал охватывает определенный участок диапазона. Например, первый — для усиления частот примерно от 30 до 1 000 Гц, а второй — для усиления частот от 1 000 до 15 000 Гц. В даль-

нейшем усиление производится отдельно для каждого канала, а выходы усилителей каждого канала нагружаются громкоговорителями, рассчитанными на воспроизведение со-



Фиг. 36. Частотные характеристики усилителя, изображенного на фиг. 34, при различных положениях регуляторов  $R_5$  и  $R_9$  и переключателей  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  ( $\Pi_4$  — в пятом положении).



Фиг. 37. Скелетная схема двухканального усилителя.

1 — регулятор громкости; 2 и 3 — разделительные сопротивления; 4 и 5 — предварительные усилители; 6 и 7 — регуляторы усиления; 8 и 9 — оконечные усилители; 10 и 11 — громкоговорители.

ответствующего участка частот. Изменением усиления одного канала по отношению к другому можно получить от установки различный тембр звучания.

Двухканальное усиление имеет ряд преимуществ перед обычным, одноканальным.

Стремление воспроизвести полный диапазон звуковых частот заставляет пользоваться агрегатам громкоговорителей, причем каждый громкоговоритель такого агрегата предназначается для воспроизведения определенного участка полосы частот. В одноканальном усилителе это влечет за собой необходимость разделения спектра частот на выходе усилителя при помощи специального разделительного фильтра, применение которого ухудшает качество работы усилителя и затрудняет согласование громкоговорителей с выходом усилителей.

Применение двухканального усиления устраняет необходимость в разделительном фильтре на выходе усилителя, так как в этом случае разделение частот выполнено на входе усилителя, а выходы усилителей каждого канала согласуются с соответствующими им громкоговорителями обычным путем при помощи выходных трансформаторов. В этом заключается первое серьезное преимущество двухканального усилителя.

Вторым преимуществом двухканального усилителя является снижение искажений, возникающих за счет комбинационных тонов (искажений взаимной модуляции). Эти искажения возникают при воздействии двух различных частот на нелинейную систему, которой является усилитель. Благодаря тому что в двухканальном усилителе низшие и высшие частоты усиливаются в отдельных усилителях, вероятность возникновения комбинационных частот значительно снижается.

Третьим преимуществом двухканального усилителя является снижение нелинейных искажений. Это обусловливается тем, что каждый усилитель усиливает только часть диапазона частот, в пределах которых можно обеспечить работу усилителя с меньшими нелинейными искажениями.

В двухканальном усилителе можно получить более резкое разделение частот по каналам при меньших фазовых искажениях.

Из акустики известно, что для большинства сложных музыкальных передач наибольшая звуковая мощность приходится на область средних частот. Поэтому усилитель высокочастотного канала может иметь мощность, значительно меньшую мощности усилителя низких и средних частот.

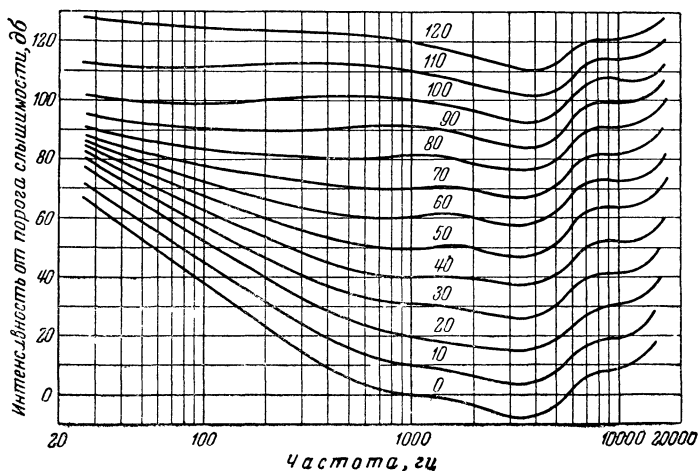
Принцип двухканального усиления впервые в мире был практически применен в СССР для целей звукового кино.

Более подробные сведения о двухканальной системе усиления читатель может прочитать в статье А. Хрущева, «Радио», № 11, 1948 г. и в статье А. Матвеевко, «Радио», № 1, 1951 г.

### 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ГРОМКОСТИ

В заключение настоящей главы необходимо сказать несколько слов о регуляторе громкости для высококачественного усилителя.

Наше ухо способно ощущать увеличение громкости как равномерное в том случае, если в действительности громкость увеличивается по логарифмическому закону. Поэтому для плавного регулирования громкости всегда применяются переменные сопротивления с логарифмической кривой.

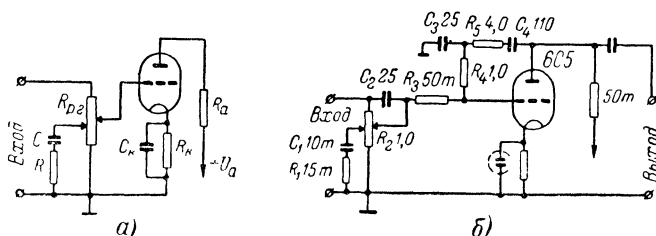


Фиг. 38. Кривые равной громкости для различных уровней.

На качество сопротивления нужно обратить серьезное внимание. При повороте оси потенциометра его сопротивление должно изменяться плавно, без скачков и перерывов. Регулятор громкости с плохими контактами испортит все впечатление от хорошей работы усилителя в целом. В громкоговорителе будет наблюдаться сильный треск, особенно неприятный при большой мощности усилителя.

Из-за того что наше ухо на разных уровнях громкости по-разному воспринимает различные частоты, в некоторых усилителях применяются так называемые частотно компенсированные регуляторы громкости. На фиг. 38 изображены

кривые равной громкости для разных уровней. Из этих кривых видно, что при большой громкости (верхняя кривая) все частоты воспринимаются ухом примерно одинаково. При понижении громкости для одинакового восприятия относительный уровень низких и высоких частот должен повышаться. При дальнейшем понижении громкости (нижняя кривая) разница в слышимости средних и крайних частот становится еще заметнее. Особенно заметно ослабление чувствительности уха к низшим частотам. Поэтому желательно при



Фиг. 39. Схемы частотно компенсированного регулирования громкости.

*а* — простая схема регулятора громкости, *б* — сложная схема регулятора громкости.

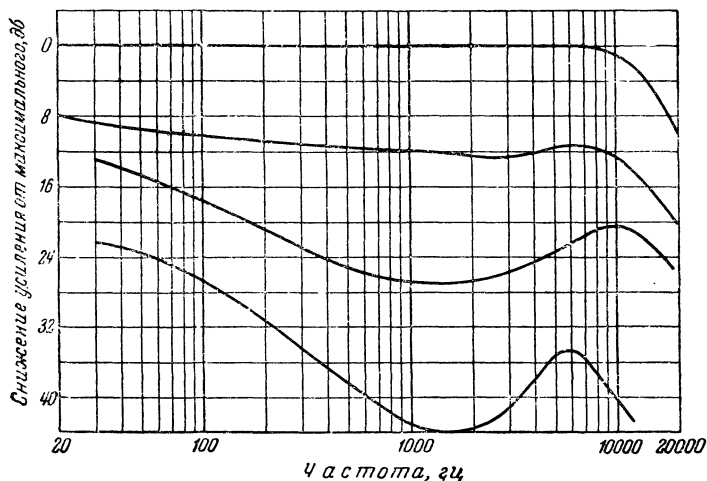
уменьшении громкости автоматически подчеркивать низшие и высшие частоты. Практически совершенно достаточно подчеркивать только низшие частоты.

На фиг. 39,а приведена простейшая схема частотно компенсированного регулятора громкости. Потенциометр регулятора громкости имеет отвод от части сопротивления. Обычно сопротивление между заземленным концом потенциометра и отводом составляет меньшую часть общего сопротивления потенциометра. Отвод соединяется с землей через последовательную цепь, состоящую из конденсатора  $C$  и сопротивления  $R$ . В верхнем положении движка потенциометра регулятора, т. е. при наибольшей громкости, шунтирующее действие корректирующей цепи  $RC$  практически не сказывается. По мере перемещения движка вниз, т. е. при уменьшении громкости, все сильнее сказывается шунтирующее действие конденсатора  $C$ , величина которого выбирается с таким расчетом, чтобы емкостное сопротивление его было большим на низших частотах и малым на средних и высших частотах. Шунтирование потенциометра емкостью приводит к относительному подчеркиванию низших частот при уменьшении громкости.

На фиг. 39,б приведена более сложная схема тонкомпенсированного регулятора громкости. Эта схема применена



в высококачественном усилителе, описанном К. Дроздовым и А. Лиепинш в статье «Высококачественный усилитель» («Радио», № 6, 1950 г.). Здесь действие цепи  $C_1R_1$  аналогично действию цепи  $RC$  в предыдущей схеме. Одновременно с подъемом усиления на низших частотах при уменьшении громкости подчеркиваются высшие частоты. Это осуществляется при помощи конденсатора  $C_2$  емкостью 25 мкмкф, обеспечивающего дополнительную связь входного гнезда усилителя с сеткой лампы на самых высших частотах.



Фиг. 40. Частотные характеристики сложного регулятора громкости при различных уровнях.

тах звукового диапазона. Сопротивление  $R_3$  служит развязкой между цепью обратной связи  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $C_3$  и регулятором громкости.

Потенциометр  $R_2$  имеет отвод от 0,2 мгом, считая снизу. На фиг. 40 показана частотная характеристика этого регулятора громкости для различных положений движка потенциометра  $R_2$ .

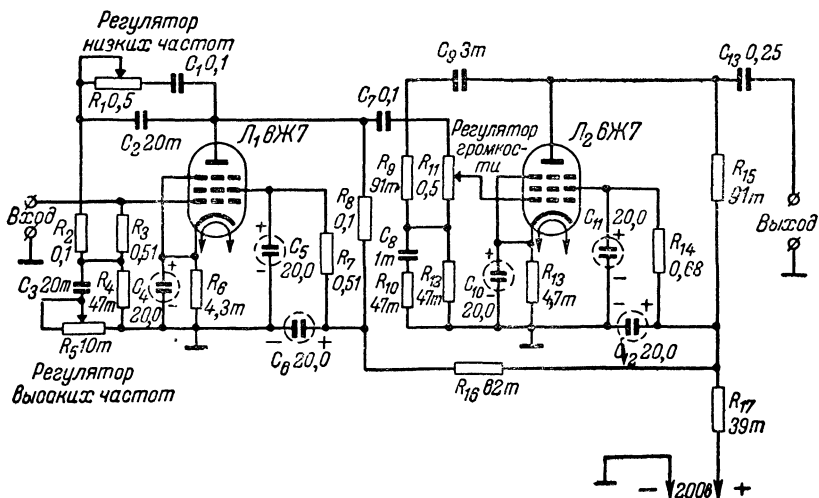
На фиг. 41 приведена схема тонкорректирующего усилителя с автоматической компенсацией низших частот при понижении громкости.

Первый каскад усилителя является тонкорректирующим. Для регулирования тона используется частотно зависимая отрицательная обратная связь с анода лампы  $L_1$  на ее сетку. Этот каскад позволяет получить максимальный подъем порядка 10 дБ на частотах 30 и 15 000 гц. Степень подъема

низших и высших частот регулируется соответственно потенциометрами  $R_1$  и  $R_5$ .

Второй каскад усилителя является тонкомпенсированным регулятором громкости. Здесь, так же как и в первом каскаде, используется частотно зависимая отрицательная обратная связь, подаваемая с анода лампы  $\Lambda_2$  на ее сетку через делитель напряжения  $C_9 - R_9 - C_8 - R_{10}$ .

Устанавливая потенциометр  $R_{11}$  регулятора громкости в положение наибольшей громкости (крайнее верхнее положение движка по схеме фиг. 41), мы вводим сопротивление



Фиг. 41. Схема корректирующего усилителя с автоматической компенсацией низших частот при понижении громкости.

Допустимая мощность рассеяния для сопротивлений  $R_1, R_8, R_{11}, R_{15} - 0,5$  вт; для  $R_{16}, R_{17} - 1$  вт, для остальных —  $0,25$  вт. Конденсаторы  $C_1, C_{10}$  рассчитаны на рабочее напряжение 25 в;  $C_5, C_6, C_{11}, C_{12}$  — на 250 в.

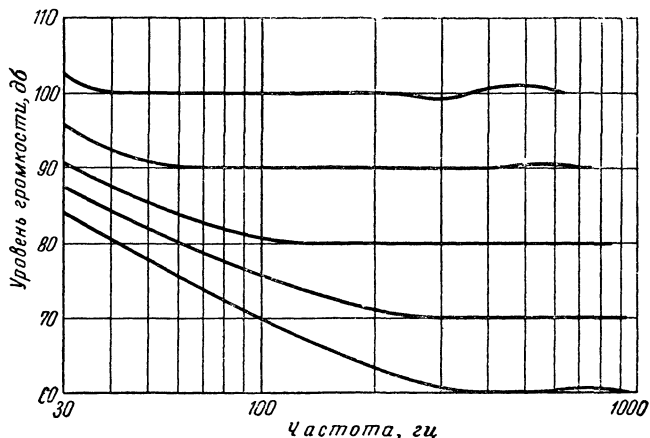
$0,5$  мгом между цепью обратной связи и сеткой лампы  $\Lambda_2$ , значительно ослабляя тем самым обратную связь. Частотная характеристика каскада при этом почти линейна.

При установке регулятора громкости в положение минимальной громкости (крайнее нижнее положение движка потенциометра  $R_{11}$ ) обратная связь увеличивается. Параметры цепи обратной связи выбраны так, что напряжение обратной связи, являясь примерно постоянным в диапазоне частот 15 000—500 гц, уменьшается на частотах от 500 до 30 гц, обеспечивая подъем усиления на частоте 30 гц до 23 дб по отношению к средним частотам.

Уменьшению громкости на средних частотах на 40 дб по отношению к максимальной соответствует уменьшение на частоте 30 гц только на 20 дб. Таким образом, при понижении громкости происходит автоматическое подчеркивание низших частот, что компенсирует ослабление чувствительности уха на этих частотах при понижении громкости.

Частотные характеристики усилителя при различных положениях регулятора громкости приведены на фиг. 42.

Усилитель (фиг. 41) можно применять в качестве промежуточного звена между детекторным каскадом радиопри-



Фиг. 42. Частотные характеристики усилителя (фиг. 41) при различных положениях регулятора громкости.

емника или корректирующего усилителя, предназначенного для воспроизведения граммпзаписи (фиг. 28 и 30), и входом оконечного усилителя.

Для эффективной работы любого тонкомпенсированного регулятора громкости нужно, чтобы напряжение сигнала, подаваемое на его вход, имело определенную величину. Для этого желательно применение добавочных потенциометров. Число этих потенциометров должно соответствовать количеству самостоятельных источников сигнала, применяемых в установке (радиоприемник, тонкорректирующий усилитель граммпзаписи, трансляционная линия, приемник звукового сопровождения телевизионных передач и т. п.).

Регулирование добавочных потенциометров производится следующим образом. Тонкомпенсированный регулятор устанавливается в положение максимальной громкости. Затем

каждый из добавочных потенциометров устанавливается в такое положение, при котором обеспечивается полная необходимая для данного помещения громкость при работе от соответствующего источника.

Дальнейшее регулирование громкости осуществляется только тонкомпенсированным регулятором, который обеспечивает сохранение натуральности звучания при понижении громкости.

### *Глава третья*

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЕ**

### **1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИИ В УСИЛИТЕЛЕ**

Сущность нелинейных искажений и их допустимая величина для высококачественных усилителей были рассмотрены в гл. 1. Разберем теперь причины возникновения нелинейных искажений.

**Влияние сеточных токов на работу усилительного каскада.** При некотором потенциале на сетке лампы относительно ее катода (этот потенциал у различных ламп колеблется от  $-0,8$  до  $+0,5$  в) в цепи сетки появляется ток, который называется сеточным током. При дальнейшем росте потенциала на сетке сеточный ток увеличивается. Наличие сеточного тока делает проводящим участок сетка — катод лампы.

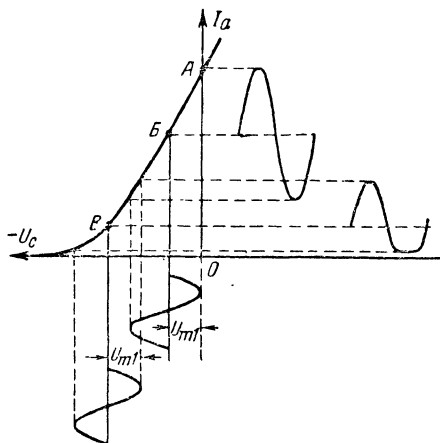
Допустим, что рабочая точка на характеристике и амплитуда переменного усиливаемого напряжения на сетке лампы выбраны так, что положительный полупериод переменного напряжения заходит в область сеточных токов. Это приводит к тому, что на время действия положительного напряжения на сетке сопротивление участка сетка — катод снижается. Работа предыдущего каскада усилителя или какого-либо другого источника переменного напряжения в этом случае происходит на нагрузку, сопротивление которой меняется. Это аналогично включению диода между сеткой и катодом лампы следующего каскада усилителя. В результате детектирования, которое будет иметь место при работе каскада с сеточными токами, форма напряжения на сетке лампы искажается. Часть периода напряжения, попадающая в область сеточных токов, притупляется, появляются нелинейные искажения.

Для того чтобы нелинейные искажения, вызванные сеточными токами, свести к минимуму, нужно так выбирать

рабочую точку на характеристике лампы и амплитуду переменного напряжения, чтобы сеточные токи отсутствовали.

Иногда в оконечных двухтактных каскадах допускается работа с заходом в область сеточных токов. Это делается для повышения экономичности выходного каскада. Для снижения нелинейных искажений в этом случае необходимо, чтобы предыдущий каскад имел низкое выходное сопротивление, так как источник тока, имеющий малое внутреннее сопротивление, менее чувствителен к изменению нагрузки, чем источник тока с большим внутренним сопротивлением. Каскад, предшествующий оконечному, для получения необходимого выходного сопротивления должен отдавать неискаженную мощность порядка 5--10% от мощности оконечного каскада.

**Влияние криволинейности характеристики лампы на нелинейные искажения.** Строго говоря, ни одна сеточная характеристика лампы не является совершенно линейной даже на наиболее прямолинейном ее участке. Однако с достаточной точностью можно считать линейным некоторый ее участок, лежащий влево от точки нулевого смещения.



Фиг. 43. Влияние криволинейности характеристики лампы на нелинейные искажения.

На фиг. 43 изображена статическая характеристика лампы, выражающая зависимость анодного тока  $I_a$  от напряжения на ее управляющей сетке  $U_c$ . Линейным участком здесь является отрезок характеристики от точки  $A$ , соответствующей нулевому напряжению на сетке до точки  $B$ , после которой характеристика приобретает заметно криволинейную форму.

Для большей наглядности будем считать, что анодная нагрузка невелика и динамическая характеристика достаточно близка к статической. Если выбрать рабочую точку на характеристике так, чтобы она соответствовала середине прямолинейного участка (точка  $B$ ), то наибольшая амплитуда входного напряжения, при которой еще не наблю-

даются заметные искажения в форме анодного тока, будет  $U_{m1}$ . При смещении рабочей точки влево (точка  $B$ ) при той же амплитуде входного напряжения  $U_{m1}$  форма анодного тока искажается, что приводит к нелинейным искажениям.

В усилителе напряжения мы не стремимся получить от лампы наибольшие мощность и к. п. д., поэтому мы можем использовать только прямолинейный участок ее характеристики и получить усиление с небольшими нелинейными искажениями.

Иначе обстоит дело с оконечным каскадом. Здесь основной задачей является получение от лампы максимальной полезной мощности. Это заставляет использовать по возможности наибольшую часть характеристики лампы. Так как заход в область сеточных токов нежелателен, то рабочим участком характеристики будет область от напряжения на сетке порядка — 0,8 в до такого отрицательного напряжения, при котором кривизна характеристики еще не слишком велика. Чем большую часть характеристики лампы мы используем, тем в более криволинейную область ее мы будем заходить при работе лампы, тем больше будут нелинейные искажения.

**Нелинейные искажения, вносимые трансформатором.** В анодных цепях ламп оконечных каскадов всех современных усилителей низкой частоты применяются выходные трансформаторы. В некоторых усилителях трансформаторы применяются и для связи между каскадами.

Действие трансформатора основано на следующем принципе. Переменный ток, проходящий через первичную обмотку трансформатора, возбуждает в его сердечнике переменный магнитный поток, который, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней переменную э. д. с.

Для большинства магнитных материалов зависимость индукции от намагничивающего поля нелинейна. Поэтому при подведении к трансформатору, имеющему сердечник из магнитного материала, синусоидального напряжения ток намагничивания получается несинусоидальным, т. е. содержит высшие гармонические составляющие.

Высшие гармонические токи намагничивания проходят через источник э. д. с. (выходную лампу) и создают на его зажимах падение высших гармоник. В результате как на первичной, так и на вторичной обмотках трансформатора появляется напряжение высших гармоник, а следовательно, возникают нелинейные искажения.

Ток намагничивания при постоянстве амплитуды подведенного к трансформатору напряжения будет наибольшим на низшей рабочей частоте; следовательно, на низших частотах нелинейные искажения будут наибольшими. При увеличении амплитуды подводимого к трансформатору напряжения нелинейные искажения также увеличиваются.

Мы вкратце остановились на основных причинах, вызывающих нелинейные искажения в усилителе. Далее мы познакомимся с наиболее существенными вопросами конструирования усилителя, имеющего малые нелинейные искажения.

Основным источником нелинейных искажений в усилителе является его оконечный каскад. Поэтому выбору правильного режима оконечной лампы должно быть уделено особенно большое внимание.

## 2. ВЫБОР ЛАМПЫ ДЛЯ ОКОНЕЧНОГО КАСКАДА

Прежде всего нужно решить вопрос выбора типа лампы. В оконечных каскадах применяются как триоды, так и пентоды или лучевые тетроды. Какому типу лампы отдать предпочтение?

Большим преимуществом триода является то, что он обеспечивает меньшие нелинейные искажения, имеет меньшее внутреннее сопротивление и менее критичен к сопротивлению анодной нагрузки, что является следствием более благоприятной формы его анодных характеристик по сравнению с пентодом. Недостатком триода является его сравнительно низкая чувствительность к входному напряжению, т. е. для получения от триода нормальной выходной мощности на его сетку нужно подать значительно большее переменное напряжение, чем для пентода.

Пентод или лучевой тетрод отдает такую же, как и триод, мощность при подаче на его сетку значительно меньшего напряжения, что является его значительным преимуществом. Однако пентод более критичен к величине сопротивления анодной нагрузки. При неправильном выборе сопротивления нагрузки пентод может вносить большие нелинейные искажения. При этом нужно учитывать то, что сопротивление нагрузки лампы, которой в нашем случае является громкоговоритель, в процессе работы изменяется с частотой.

Применение сильной отрицательной обратной связи снижает внутреннее сопротивление пентода, благодаря чему

уменьшаются нелинейные искажения из-за изменения сопротивления анодной нагрузки лампы.

В настоящее время в высококачественных усилителях применяются в равной степени как триоды, так и пентоды или лучевые тетроды. В тех случаях, когда нужно получить особенно малые нелинейные искажения, все же предпочтительнее применение в оконечных каскадах трехэлектродных ламп, несмотря на необходимость подводить к сеткам триода большие напряжения раскачки. Усилители на пентодах получаются более экономичными и имеют несколько большие по сравнению с триодными усилителями нелинейные искажения. Иногда применяются тетроды и пентоды в триодном соединении.

После выбора типа лампы (триод или пентод), что делается на основании вышеизложенных соображений, нужно выбрать лампу, имеющую соответствующую выходную мощность.

Для высококачественных усилителей наиболее подходящим типом лампы можно считать тетроды 6П6С (6V6) и 6ПЗС (6ПЗ). Использование этих ламп в двухтактной схеме позволяет получить неискаженную выходную мощность от 8 до 25 *вт*. Из триодов может быть использована лампа 2С4С (2А3) или аналогичная ей, но рассчитанная на напряжение накала 6,3 *в* лампа 6С4С (6В4).

Очень хорошие результаты дает применение генераторного лучевого тетрода типа Г-807 в триодном включении. В двухтактной схеме при напряжении на аноде 450 *в* такой усилитель отдает мощность порядка 15 *вт* при ничтожно малых нелинейных искажениях.

### 3. ВЫБОР РЕЖИМА ЛАМПЫ ОКОНЕЧНОГО КАСКАДА

Следующей задачей после выбора типа лампы является правильный выбор режима работы оконечного каскада. В любительских условиях едва ли есть необходимость производить расчет оконечного каскада по характеристикам лампы, так как в справочниках обычно для каждого типа оконечной лампы приводятся типовые режимы, которые нужно принимать за основу при конструировании усилителя.

Из справочника определяются следующие величины характеризующие режим лампы: 1) анодное напряжение  $U_a$ ; 2) напряжение экранной сетки  $U_{c2}$ ; 3) напряжение смещения  $U_c$  (или величина сопротивления  $R_k$  в катode лампы); 4) напряжение раскачки на сетке лампы  $U_{mc}$ ; 5) максималь-



ная амплитуда анодного тока  $I_{ma}$ ; 6) максимальная амплитуда тока экранной сетки  $I_{mc2}$ ; 7) внутреннее сопротивление лампы  $R_i$ ; 8) оптимальное сопротивление анодной нагрузки  $R'_n$ ; 9) величина полезной отдаваемой мощности  $P_{вых}$ ; 10) коэффициент нелинейных искажений  $\gamma$ ; 11) максимально допустимая мощность рассеяния на аноде  $P_{a макс}$ . Зная все эти величины, можно вполне сознательно подойти к выбору элементов схемы оконечного каскада усилителя.

Прежде всего необходимо, чтобы выпрямитель, предназначенный для питания усилителя, обеспечивал нужное для нормальной работы оконечной лампы напряжение  $U_a$  и отдавал бы при этом нормальный ток.

Если мощный усилитель выполнен в виде отдельного блока и, кроме оконечного каскада, содержит еще 2—3 каскада, то потребляемый им ток от выпрямителя можно ориентировочно определить как сумму анодного тока  $I_{a0}$  оконечной лампы, тока  $I_{c2}$  экранной сетки, тока, потребляемого каскадами предварительного усиления и фазоперевертывающим каскадом. Сумма двух последних токов приблизительно равна 20—30 *ма*, а  $I_{a0}$  и  $I_{c2}$  находятся из справочника. В том случае, когда применяется двухтактная схема оконечного каскада,  $I_{a0}$  и  $I_{c2}$  даются в справочнике как сумма токов обеих ламп в графе, соответствующей использованию лампы в двухтактной схеме.

Величину выпрямленного напряжения, которую должен обеспечить выпрямитель на выходе фильтра, можно определить как сумму анодного напряжения  $U_a$  оконечной лампы, напряжения смещения  $U_c$  на сетке лампы (в том случае, когда применяется автоматическое смещение) и падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки выходного трансформатора, которое может быть приблизительно принято равным 10 *в*.

Если в справочнике не приведена величина сопротивления катодного смещения  $R_k$ , то она может быть определена по формуле

$$R_k = \frac{U_{c0}}{I_{a0}},$$

где  $R_k$  — сопротивление автоматического смещения, *ом*;

$U_{c0}$  — напряжение смещения на сетке, *в* (определяемое из справочника);

$I_{a0}$  — анодный ток лампы (или обеих ламп при двухтактной схеме) при отсутствии напряжения сигнала, *а*.

Напряжение на экранной сетке оконечной лампы часто берется равным анодному напряжению. В этом случае схема питания экранной сетки чрезвычайно проста; она присоединяется к тому концу первичной обмотки выходного трансформатора, который подключен к плюсовому зажиму фильтра выпрямителя. В том случае, когда напряжение на экранной сетке должно быть меньше анодного напряжения, это напряжение удобно снимать со второй ячейки фильтра, образованной сопротивлением и конденсатором. Сопротивление выбирается из такого расчета, чтобы на нем падал излишек напряжения. Емкость конденсатора должна быть взята не менее 8 мкф. Отсюда же целесообразно питать аноды фазоперевертывающего каскада.

Для питания анодов предварительных каскадов желательно применение еще одной ячейки фильтра. Это снизит пульсацию выпрямленного напряжения в тех каскадах усилителя, которые наиболее чувствительны к ней, и уменьшит фон переменного тока на выходе усилителя.

Для каждой оконечной лампы среди других величин, определяющих режим ее работы в оконечном каскаде, приводится наиболее выгодное (оптимальное) значение сопротивления анодной нагрузки  $R'_n$ . Величина  $R'_n$  меняется от сотен до десятка тысяч ом в зависимости от типа выходной лампы.

Непосредственное включение звуковой катушки динамического громкоговорителя в анодную цепь лампы не позволяет обеспечить оптимальную анодную нагрузку  $R'_n$  по той причине, что сопротивление звуковой катушки современного громкоговорителя делается небольшим (2—15 ом).

Для того чтобы преобразовать сопротивление нагрузки (в данном случае — сопротивление звуковой катушки)  $R_n$  в нужное нам сопротивление  $R'_n$ , применяется выходной трансформатор. О расчете выходного трансформатора будет сказано в гл. 4.

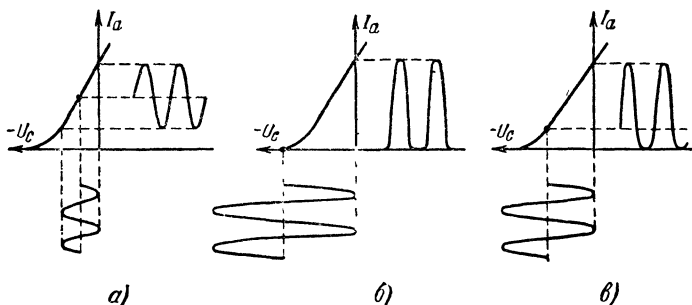
Несколько слов необходимо сказать о режимах работы лампы в оконечном каскаде. Различают следующие режимы.

**Режим класса А** (фиг. 44,а). Лампа в этом режиме отдает ток в нагрузку в течение всего периода действующего на ее сетке переменного напряжения. Обычно при этом заход в область положительных напряжений сетки не допускается. Смещение на сетке выбирается таким, чтобы рабочая точка была на середине прямолинейного участка сеточной характеристики. Режим характерен тем, что постоянная

составляющая анодного тока велика, к. п. д. каскада низок (порядка 20—30%) и нелинейные искажения малы.

Режим класса А применяется главным образом в одноконтурных усилителях, когда применение других режимов вызвало бы появление больших нелинейных искажений.

**Режим класса В** (фиг. 44,б). Постоянное смещение и амплитуда переменного напряжения выбраны так, что лампа отдает ток в нагрузку только в течение половины периода действующего на сетке переменного напряжения. Рабочая точка выбрана у начала сеточной характеристики



Фиг. 44. Положение рабочей точки на характеристике лампы в различных режимах работы.  
а — режим класса А; б — режим класса В; в — режим класса АВ.

лампы. Благодаря тому что при отсутствии сигнала на сетке анодный ток лампы близок к нулю, к. п. д. каскада повышается до 65—70%.

Режим класса В может применяться только в двухтактной схеме, так как нелинейные искажения, вносимые одной лампой, очень велики (до 40%). Это объясняется тем, что только половина периода приложенного переменного напряжения воспроизводится в анодной нагрузке; в остальную часть периода анодный ток лампы равен нулю. В высококачественных усилителях небольшой мощности режим класса В распространения не получил.

**Режим класса АВ** (фиг. 44,в). Этот режим является средним между режимами классов А и В. Постоянное смещение и амплитуда переменного напряжения подобраны так, что рабочая точка лежит на нижнем криволинейном участке сеточной характеристики лампы, а ток в анодной цепи лампы протекает в течение всего положительного полупериода переменного напряжения на сетке и части отрицательного полупериода. Как и в режиме класса В, форма

анодного тока не воспроизводит формы всего периода сигнала на сетке, поэтому такой режим может применяться только в двухтактной схеме (к. п. д. каскада около 40—50%).

Различают режим работы лампы без захода в положительную область сеточной характеристики, т. е. при отсутствии сеточных токов (в этом случае рядом с буквой, обозначающей режим, ставится цифра 1), и режим с сеточными токами, т. е. с заходом в положительную область сеточной характеристики (для обозначения этого режима ставится цифра 2).

Режим класса А, как правило, применяется без токов сетки, а режим класса АВ может быть и с заходом в область сеточных токов (соответственно эти режимы будут обозначаться АВ<sub>1</sub> и АВ<sub>2</sub>). Для целей высококачественного усиления низкой частоты при мощностях порядка 10—25 *вт* целесообразно отказаться от применения режима АВ<sub>2</sub>, так как работа с сеточными токами требует мощного предоконечного каскада.

Режим класса В обычно применяется в мощных усилителях, где вопрос повышения к. п. д. имеет большое значение, поэтому эти усилители чаще всего работают в режиме класса В<sub>2</sub>, так как заход в область положительных напряжений на сетке позволяет получить максимальный к. п. д. В любительских усилителях этот режим распространения не получил из-за трудностей, связанных с необходимостью отодвигать рабочую точку на характеристике лампы в область отсутствия анодного тока, и в связи с трудностью получения стабильной работы усилителя.

Для небольших любительских усилителей мощностью 10—25 *вт* наиболее удобными режимами являются режимы классов А<sub>1</sub> и АВ<sub>1</sub>. Эти режимы при применении двухтактной схемы и отрицательной обратной связи по напряжению обеспечивают работу с низкими нелинейными искажениями (порядка 1—2%) при применении сравнительно маломощных ламп (6П6С—6П3С) и небольшом потреблении мощности от выпрямителя (300—400 *в*, 70—120 *ма*).

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХТАКТНОЙ СХЕМЫ

В настоящее время оконечные каскады подавляющего большинства высококачественных усилителей низкой частоты выполняются по двухтактной схеме, которая имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с обычной однотактной схемой.

Первым преимуществом такой схемы является то, что

выходной трансформатор работает без постоянного подмагничивания; это облегчает его конструкцию и снижает искажения в трансформаторе. Причиной устранения постоянного подмагничивания является то обстоятельство, что анодные токи оконечных ламп текут от средней точки выходного трансформатора в противоположных направлениях и при однородности ламп взаимно компенсируют магнитные потоки, создаваемые ими в сердечнике трансформатора.

Вторым важным преимуществом двухтактной схемы является способность ее почти полностью уничтожать четные гармоники, получившиеся за счет нелинейности характеристик оконечных ламп ( правда, при этом нечетные гармоники увеличиваются). Обычно в результате нелинейных искажений наибольшую амплитуду имеет 2-я гармоника, и ее устранение резко снижает процент нелинейных искажений, вносимых оконечным каскадом.

Третьим преимуществом двухтактной схемы является то, что при применении ее оконечные лампы могут работать в режиме классов  $AB_1$ ,  $AB_2$  и В. Это повышает к. п. д. усилителя и позволяет получить такую же, как и в однотактной схеме, мощность, но при меньшем расходе энергии от выпрямителя.

Четвертым преимуществом двухтактной схемы перед однотактной является ее малая чувствительность к пульсации питающего напряжения. Объясняется это опять-таки симметрией схемы, так как повышение или понижение напряжения на аноде лампы одного плеча происходит одновременно с таким же повышением или понижением в другом плече, благодаря чему рост анодного тока одной лампы сопровождается таким же увеличением тока во второй лампе. В силу того что токи в выходном трансформаторе направлены в противоположные стороны, пульсация напряжения не будет вызывать тока во вторичной обмотке трансформатора, и фон переменного тока в громкоговорителе прослушиваться не будет. Двухтактная схема также менее чувствительна к пульсации постоянных напряжений, питающих сеточные цепи оконечного каскада.

Недостатками двухтактной схемы являются некоторое усложнение усилителя, связанное с необходимостью подавать на сетки оконечных ламп напряжение сигнала в противоположной фазе, а также необходимость применения двух ламп в оконечном каскаде вместо одной. Однако эти недостатки вполне окупаются теми преимуществами, которые позволяет получить двухтактная схема.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Отрицательная обратная связь позволяет резко улучшить основные качественные показатели усилителя низкой частоты, благодаря чему она в настоящее время чрезвычайно широко применяется в высококачественных усилителях. В результате применения отрицательной обратной связи удается в значительной степени снизить нелинейные искажения и фон переменного тока, улучшить частотную характеристику усилителя, снизить выходное сопротивление его.

Как известно, принцип отрицательной обратной связи заключается в том, что часть напряжения сигнала с выхода усилителя подается на его вход в фазе, противоположной фазе сигнала на входе. Этим как бы уменьшается входное напряжение. Для того чтобы сохранить напряжение на выходе усилителя на прежнем уровне, необходимо увеличивать амплитуду входного сигнала, что эквивалентно уменьшению коэффициента усиления усилителя.

Скелетная схема усилителя с отрицательной обратной связью была приведена на фиг. 19. Напряжение на выходе усилителя равно  $U_{вых}$ . Это напряжение при помощи делителя уменьшается в  $\beta$  раз и подается на вход усилителя так, чтобы его фаза была противоположна фазе входного напряжения  $U_{вх}$ . Такая схема называется схемой обратной связи по напряжению и наиболее распространена в усилителях.

Без обратной связи усилитель имеет коэффициент усиления  $K$ . Посмотрим, как изменится коэффициент усиления при применении отрицательной обратной связи.

При воздействии напряжения обратной связи на входе усилителя будет действовать не прежнее значение напряжения  $U_{вх}$ , а уменьшенное —  $U_c$ . Очевидно, что

$$U_c = U_{вх} - U_{ос}$$

где  $U_c$  — напряжение, фактически действующее на входе усилителя;

$U_{вх}$  — напряжение сигнала на входных зажимах усилителя;

$U_{ос}$  — напряжение обратной связи.

Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью

$$K_{ос} = \frac{K}{1 + \beta K},$$

где  $K_{oc}$  — коэффициент усиления усилителя с обратной связью;

$K$  — коэффициент усиления усилителя без обратной связи;

$\beta$  — коэффициент обратной связи, показывающий, во сколько раз напряжение обратной связи меньше выходного напряжения усилителя, т. е.  $\beta = \frac{U_{oc}}{U_{вых}}$ . Коэффициент  $\beta$  может принимать значения от 0 до 1 в зависимости от глубины обратной связи. Произведение  $\beta K$  называется фактором обратной связи и является характерной величиной для усилителя с обратной связью.

Приведенная выше формула показывает, что при применении отрицательной обратной связи коэффициент усиления усилителя уменьшается в  $1 + \beta K$  раз. Для того чтобы сохранить усиление на нужном нам уровне, приходится иногда вводить в усилитель один или даже два дополнительных каскада усиления.

Каким образом при применении отрицательной обратной связи удастся уменьшить нелинейные искажения в усилителе? Физически это можно представить себе так.

Допустим, что усилитель вносит искажение в форму сигнала; это значит, что наряду с основной гармоникой на выходе усилителя будут присутствовать вторая, третья и т. д. гармоники. Попадая через цепь обратной связи на вход усилителя, эти гармоники, будучи в противофазе, вызовут на выходе усилителя напряжение, которое будет компенсировать напряжение гармоник. Вполне понятно, что при этом будет ослабляться и первая, полезная для нас гармоника, но ее мы можем увеличить, увеличивая напряжение сигнала на входе усилителя. В результате процентное содержание гармоник на выходе усилителя удастся значительно снизить применением отрицательной обратной связи и тем значительнее, чем сильнее обратная связь.

Если мы через  $\gamma_{oc}$  обозначим коэффициент нелинейных искажений в усилителе с обратной связью, а через  $\gamma$  — коэффициент нелинейных искажений в том же усилителе, но без отрицательной обратной связи, то  $\gamma_{oc}$  можно выразить формулой

$$\gamma_{oc} = \frac{\gamma}{1 + \beta K},$$

где  $\beta K$  — фактор обратной связи.

Из формулы видно, что коэффициент нелинейных искажений уменьшается в  $1 + \beta K$  раз по сравнению с его значением при отсутствии обратной связи.

Отрицательная обратная связь уменьшает частотные искажения в усилителе. Физически это можно объяснить следующим образом.

Допустим, что на вход усилителя подаются три сигнала; один из них имеет частоту, скажем, 50 гц, другой — 1 000 гц, а третий — 10 000 гц. Допустим также, что амплитуды этих трех сигналов одинаковы. Если усилитель вносит частотные искажения, то амплитуды сигналов на выходе для различных частот уже не будут одинаковыми. Представим себе, что усилитель плохо усиливает низкие и высокие частоты, благодаря чему амплитуды сигналов, имеющих 50 и 10 000 гц на выходе усилителя, будут меньше амплитуды сигнала с частотой 1 000 гц. Применяя отрицательную обратную связь, мы подадим часть выходного сигнала обратно на вход усилителя. Но, поскольку в результате частотных искажений в усилителе амплитуды крайних частот имеют меньшие амплитуды по сравнению с амплитудой сигнала 1 000 гц, то и напряжение обратной связи для этих частот будет меньше, и обратная связь в меньшей мере ослабит напряжение на входе усилителя именно для этих крайних частот, в результате чего напряжение на выходе на всех трех частотах будет стремиться выравниваться, т. е. частотные искажения уменьшатся. То же произойдет и в том случае, когда усилитель подчеркивает крайние частоты. Напряжение обратной связи для этих частот будет увеличено, в результате чего усиление всех частот будет стремиться выравниваться.

Если обозначить коэффициент частотных искажений усилителя с обратной связью для какой-то частоты через  $M_{oc}$ , а тот же коэффициент, но для усилителя без обратной связи, — через  $M$ , то величина  $M_{oc}$  определится по формуле

$$M_{oc} = \frac{M}{1 + \beta K}.$$

Отсюда видно, что частотные искажения уменьшились в  $1 + \beta K$  раз.

Обратная связь может охватывать и не весь усилитель, а только 1—2 каскада. В этом случае также произойдет уменьшение искажений, вносимых усилителем, но только тех искажений, которые возникают в каскадах, охваченных обратной связью. Так, например, если усилитель имеет



4 каскада усиления, а обратная связь подается с выхода усилителя на вход 3-го каскада, то все искажения, возникающие в 1-м и 2-м каскадах, ни в какой степени уменьшены обратной связью не будут. Это обстоятельство необходимо учесть в том случае, когда в усилитель вводится регулирование громкости. Схема регулирования должна помещаться до тех каскадов, которые охвачены обратной связью. В противном случае регулирование будет весьма неэффективным за счет выравнивающего действия отрицательной обратной связи.

Чем глубже отрицательная обратная связь в усилителе, тем в большей степени улучшает она частотную характеристику его и уменьшает нелинейные искажения; поэтому желательно применение возможно более глубокой обратной связи. Однако на пути увеличения обратной связи лежит ряд трудностей.

Во-первых, при глубокой обратной связи сильно снижается усиление, что влечет за собой или необходимость увеличения сигнала на входе усилителя, или увеличение числа каскадов усиления. Увеличивать сигнал на входе не всегда возможно, так как связанное с этим увеличение числа ламп в усилителе нежелательно с точки зрения усложнения и удорожания усилителя.

Во-вторых, при увеличении глубины обратной связи не всегда удастся получить устойчивую работу усилителя. Дело в том, что выгодно охватить обратной связью по возможности все каскады усилителя, включая и выходной трансформатор. Этим самым возможно исправить искажения, внесенные каждым каскадом, в том числе и искажения, вносимые трансформатором. Но увеличению числа каскадов, охваченных обратной связью, препятствует то, что каждый каскад усилителя вносит определенные фазовые искажения, которые тем больше, чем больше реактивных элементов включено в схему усилителя. К реактивным элементам относятся переходные конденсаторы, междуэлектродные емкости ламп, индуктивность рассеяния выходного трансформатора. Все это приводит к тому, что на отдельных участках диапазона усиливаемых частот отрицательная обратная связь перестает быть отрицательной, и вместо уменьшения усиления может наступить увеличение его и даже самовозбуждение усилителя.

Практически нетрудно получить устойчивую работу усилителя при охвате обратной связью двух каскадов усиления с выходным трансформатором обычной конструкции и  $\beta$

порядка 0,1—0,15. Однако при этом мы не получим полного эффекта от применения обратной связи. Поэтому в наиболее совершенных усилителях низкой частоты обратная связь охватывает три и даже четыре каскада усиления. В таких усилителях приходится обращать особое внимание на уменьшение фазовых искажений как в самой схеме усилителя, так и в выходном трансформаторе. К выходному трансформатору предъявляются требования, заключающиеся в том, чтобы свести к минимуму индуктивность рассеяния его обмоток. Можно прямо сказать, что чем лучше будет выполнен выходной трансформатор, тем устойчивее будет работать усилитель и тем более глубокую обратную связь можно будет получить в усилителе. В дальнейшем мы остановимся более подробно на том, какие требования предъявляются к выходному трансформатору, предназначенному для работы в высококачественном усилителе низкой частоты.

Несколько слов необходимо сказать о количественной оценке обратной связи в усилителе. Обычно степень обратной связи оценивается уже знакомой нам величиной коэффициента обратной связи  $\beta = \frac{U_{вых}}{U_{oc}} \cdot 100\%$ . Величина  $\beta$  выражается в процентах.

Коэффициент обратной связи  $\beta$  не полностью характеризует глубину обратной связи в многокаскадных усилителях, имеющих большой коэффициент усиления  $K$ . Удобнее оценивать глубину обратной связи по тому, насколько она уменьшает коэффициент усиления усилителя. Из ранее приведенной формулы видно, что коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью  $K_{oc}$  меньше коэффициента усиления  $K$  того же усилителя, но без обратной связи в  $1 + \beta K$  раз. Величину  $1 + \beta K$  удобно назвать характеристикой отрицательной обратной связи. Характеристика отрицательной обратной связи равна  $1 + \beta K = \frac{K}{K_{oc}}$ .

Часто характеристику обратной связи выражают в децибелах; тогда

$$1 + \beta K = 20 \lg \frac{K}{K_{oc}} \text{ дб.}$$

Для высококачественного усилителя низкой частоты  $1 + \beta K$  должно быть порядка 20—30 дб.

Различают два вида отрицательной обратной связи, отличающихся один от другого способами подачи напряжения сигнала с выхода усилителя на его вход.

**Отрицательная обратная связь по току.** При этом виде связи напряжение, подаваемое на вход усилителя, пропорционально току на его выходе.

Примером обратной связи по току является отрицательная обратная связь с катода лампы на ее сетку в случае применения нешунтированного или слабо шунтированного емкостью сопротивления смещения в катоде лампы.

**Отрицательная обратная связь по напряжению.** При этом виде связи напряжение, подаваемое на вход усилителя, пропорционально его выходному напряжению. Примером обратной связи по напряжению является отрицательная обратная связь, подаваемая на вход усилителя с первичной или вторичной обмотки выходного трансформатора, а также с анода лампы на ее сетки.

Практические схемы оконечных усилителей с отрицательной обратной связью будут рассмотрены ниже.

**Советы конструктору.** При конструировании высококачественного усилителя низкой частоты нужно предусмотреть следующие меры, уменьшающие нелинейные искажения:

1. В усилителе напряжения ни в коем случае не следует допускать захода в область положительных напряжений на сетке. Нельзя допускать перегрузки усилителя. Максимальная амплитуда сигнала на сетке лампы каждого каскада должна быть примерно на 0,8 в меньше величины установленного для нее отрицательного смещения.

2. В усилителе мощности можно допустить работу с сеточными токами только в случае применения двухтактной схемы (режим АВ<sub>2</sub> или В<sub>2</sub>) при условии достаточной мощности предоконечного каскада. Для любительских целей лучше отказаться от применения режимов, допускающих наличие сеточных токов; это позволит еще больше снизить нелинейные искажения.

3. Для усиления напряжения надо использовать только прямолинейный участок характеристики лампы.

4. Надо по справочнику выбрать лампу, способную отдать нужную неискаженную мощность, и найти наилучший режим работы лампы в оконечном каскаде, обеспечивающий наименьшие нелинейные искажения при требуемой выходной мощности.

5. Правильным расчетом элементов схемы оконечного каскада обеспечить работу лампы в выбранном режиме.

6. Необходимо правильно рассчитать коэффициент трансформации выходного трансформатора и сечение его сердечника (расчет трансформатора см. ниже).

7. Рекомендуется применить двухтактную схему оконечного каскада. Наименьшие искажения получаются при применении режимов класса А и несколько большие — в классе АВ<sub>1</sub>. При двухтактной схеме необходимо добиться по возможности наилучшей симметрии плеч, для чего при изготовлении выходного трансформатора следует обратить внимание на симметричность обеих половинок первичной обмотки.

8. Использовать достаточно глубокую отрицательную обратную связь (20—30 дБ), охватив обратной связью по возможности большее число каскадов усилителя (но не более 4). При конструировании усилителя с глубокой отрицательной обратной связью нужно обратить особое внимание на конструкцию выходного трансформатора, помня, что высокое качество выходного трансформатора является важнейшим условием того, что усилитель будет работать устойчиво.

Соблюдая перечисленные выше меры, можно сконструировать усилитель, имеющий весьма низкий процент нелинейных искажений (0,4—0,5%) при мощности 8—15 Вт с использованием двух ламп 6ПЗС или Г-807 в оконечном каскаде.

## *Глава четвертая*

### **ВЫХОДНОЙ ТРАНСФОРМАТОР**

В предыдущей главе было отмечено, что для нормальной работы лампы в оконечном каскаде необходимо, чтобы сопротивление анодной нагрузки имело вполне определенную величину. При этом лампа отдает нормальную для нее выходную мощность и вносит минимальные нелинейные искажения.

Для согласования низкого сопротивления звуковой катушки (2—15 Ом) с анодной цепью лампы, требующей сопротивления анодной нагрузки порядка 2 500—10 000 Ом, применяется понижающий выходной трансформатор. Как же выполняет трансформатор свою роль? Для ответа на этот вопрос мы должны познакомиться с основными параметрами, характеризующими трансформатор, а также с так называемой эквивалентной схемой трансформатора.

#### **1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА**

Действие трансформатора заключается в том, что к одной из двух обмоток, намотанных на общий стальной сердечник, называемой первичной обмоткой, подключается ис-

точник переменной э. д. с. Под воздействием э. д. с. в первичной обмотке течет ток  $I_1$ , который возбуждает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Этот поток, пронизывая витки второй обмотки, называемой вторичной, индуцирует в ней вторичную э. д. с. Если нагрузить вторичную обмотку сопротивлением  $R_n$ , то по нему потечет ток  $I_2$ . Напряжение и ток во вторичной обмотке трансформатора зависят от напряжения, приложенного к первичной обмотке, и от соотношения чисел витков первичной и вторичной обмоток ( $w_1$  и  $w_2$ ).

Отношение числа витков первичной обмотки  $w_1$  к числу витков вторичной  $w_2$  называется коэффициентом трансформации  $n$  трансформатора. Отношение напряжения  $U_1$  в первичной обмотке к напряжению  $U_2$  вторичной равно коэффициенту трансформации  $n$ :

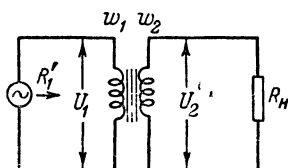
$$\frac{U_1}{U_2} = n = \frac{w_1}{w_2}.$$

Предположим, что трансформатор является идеальным, т. е. таким, у которого сопротивления первичной и вторичной обмоток равны нулю и нет индуктивности рассеяния и потерь мощности в стали сердечника. Таких трансформаторов в действительности не бывает, но для наших выводов выгодно пользоваться понятием об идеальном трансформаторе.

Допустив отсутствие потерь мощности в идеальном трансформаторе, мы можем сказать, что мощность  $P_1$ , подводимая от генератора переменного тока (фиг. 45), равна мощности, выделяемой на нагрузочном сопротивлении  $R_n$ , включенном во вторичную обмотку. Из электротехники известно, что электрическая мощность, выделяемая на сопротивлении  $R_n$ , связана с напряжением на этом же сопротивлении соотношением

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_n},$$

где  $P_2$  — мощность, выделяемая на сопротивлении  $R_n$ , *вт*;  
 $U_2$  — напряжение на концах вторичной обмотки, *в*;  
 $R_n$  — сопротивление нагрузки, *ом*.



Фиг. 45. Принципиальная схема идеального трансформатора.

То же самое выражение мы можем применить и для мощности  $P_1$ , отбираемой от генератора:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1'},$$

где  $P_1$  — мощность, отбираемая от генератора, *вт*;

$U_1$  — напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора, *в*;

$R_1'$  — кажущееся сопротивление между зажимами первичной обмотки, на которое нагружен генератор, *ом* ( $R_1'$  является входным сопротивлением трансформатора).

Воспользовавшись тем, что мощности в первичной и вторичной цепях трансформатора равны (т. е.  $P_1 = P_2$ ), мы можем приравнять и правые части формул, выражающих  $P_1$  и  $P_2$ , т. е.

$$\frac{U_1^2}{R_1'} = \frac{U_2^2}{R_n}; \quad \frac{U_1}{U_2} = n.$$

Отсюда

$$U_2 = \frac{U_1}{n};$$

тогда

$$\frac{U_1^2}{R_1'} = \frac{U_1^2}{n^2 R_n}.$$

Сократив правую и левую части получившегося уравнения на  $U_1^2$ , получим:

$$\frac{1}{R_1'} = \frac{1}{n^2 R_n},$$

или

$$R_1' = n^2 \cdot R_n.$$

Полученная формула показывает, что трансформатор, имеющий коэффициент трансформации  $n$  и нагруженный на сопротивление  $R_n$ , представляет собой сопротивление  $R_1'$  для генератора, который питает этот трансформатор электрической энергией. Сопротивление  $R_1'$  называется сопротивле-

нием, приведенным к первичной цепи трансформатора. Оно в  $n^2$  раз больше сопротивления  $R_n$ , на которое нагружен трансформатор. Из полученной формулы видно также, что имея какую-то заданную величину  $R_n$  и изменяя соответствующим образом коэффициент трансформации  $n$ , мы можем преобразовать сопротивление  $R$  в нужную нам величину сопротивления  $R_1'$ . В случае применения такого трансформатора в качестве выходного для окончного каскада усилителя мы можем так подобрать коэффициент трансформации  $n$ , что сопротивление громкоговорителя будет приведено к первичной обмотке как выбранная нами величина сопротивления анодной нагрузки  $R_1'$ .

Зная же величины  $R_1'$  и  $R_n$ , можно определить коэффициент трансформации  $n$  выходного трансформатора (без учета потерь в нем) по формуле

$$n = \sqrt{\frac{R_1'}{R_n}}.$$

## 2. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА РЕАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В предыдущем параграфе мы ввели понятие об идеальном трансформаторе и там же оговорились, что в действительности таких идеальных трансформаторов не бывает. Чем же отличается реальный трансформатор от идеального?

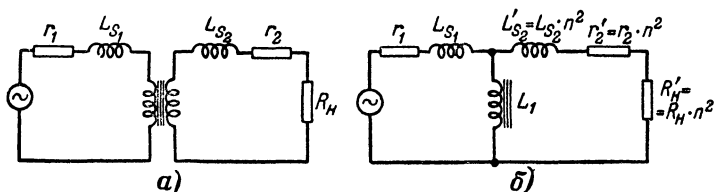
Во-первых, сопротивления первичной и вторичной обмоток не равны нулю. На сопротивлениях первичной и вторичной обмоток происходит потеря некоторой части энергии, подводимой к трансформатору. Эта энергия идет на нагревание проводов первичной и вторичной обмоток и рассеивается в виде тепла. Сопротивления обеих обмоток можно представить на схеме как некоторые сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ , включенные последовательно с первичной и вторичной обмотками (фиг. 46,а).

Во-вторых, не весь магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, пронизывает витки вторичной обмотки; часть силовых линий, минуя витки вторичной обмотки, замыкается в первичной обмотке. Это так называемый поток рассеяния. Физически действие потока рассеяния можно представить себе как некоторую небольшую индуктивность  $L_{s1}$ , включенную последовательно с первичной обмоткой.

Нужно учесть, что не только первичная обмотка создает

магнитный поток во вторичной, но и вторичная обмотка, поскольку в ней протекает ток, также создает магнитный поток, пронизывающий витки первичной обмотки. При этом не весь магнитный поток вторичной обмотки пересекает витки первичной обмотки; часть силовых линий замыкается во вторичной обмотке, образуя поток рассеяния, который называется потоком рассеяния вторичной обмотки. Его можно представить себе как некоторую индуктивность  $L_{s2}$ , включенную последовательно со вторичной обмоткой.

Индуктивности рассеяния  $L_{s1}$  и  $L_{s2}$  уменьшают усиление на высоких частотах и создают фазовые сдвиги в спектре усиливаемого сигнала.



Фиг. 46. Схемы реального трансформатора.

*a* — упрощенная принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема.

В-третьих, мы не принимали во внимание потери мощности на вихревые токи в сердечнике и потери на перемагничивание стали сердечника переменным током (эти потери очень малы и мы не ввели их в схему фиг. 46, *a*).

Учтя перечисленные выше потери, можно построить эквивалентную схему реального трансформатора (фиг. 46, *б*), которая позволит более наглядно представить себе поведение трансформатора на различных частотах звукового диапазона.

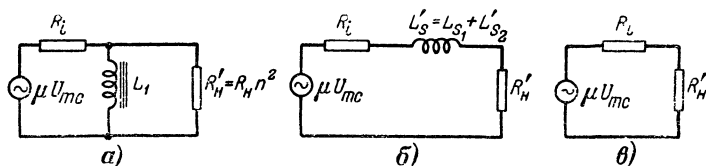
Будучи подключена к генератору переменной э. д. с. (таким генератором в нашем случае является лампа оконечного каскада), такая схема будет вести себя по отношению к генератору так же, как трансформатор, нагруженный на сопротивление  $R_n$ . Действительно, первичную обмотку мы можем представить себе как дроссель, обладающий индуктивностью  $L_1$ . Индуктивность рассеяния  $L_{s2}$ , сопротивление вторичной обмотки  $r_2$  и сопротивление нагрузки  $R_n$  мы можем известным нам методом пересчитать в первичную обмотку, для чего помножим  $L_{s2}$ ,  $r_2$  и  $R_n$  на квадрат коэффициента трансформации  $n$ . В таком виде перечисленные параметры вторичной цепи указаны на эквивалентной схеме фиг. 46, *б*.



Пользуясь эквивалентной схемой, рассмотрим частотную характеристику выходного каскада усилителя. Для рассмотрения эквивалентной схемы вполне допустимо пренебречь сопротивлениями обмоток ( $r_1$  и  $r_2$ ). При определении коэффициента трансформации  $n$  влияние сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  учитывается введением в формулу для  $n$  к. п. д. трансформатора  $\eta = 0,85 \div 0,9$ .

### 3. ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫХОДНОГО КАСКАДА С ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВЫХОДОМ

Для изучения работы трансформатора на различных частотах дадим упрощенные эквивалентные схемы для каждого интересующего нас участка частотного диапазона (фиг 47). На этих схемах генератором переменной э. д. с. является лампа оконечного каскада с внутренним сопротивлением  $R_i$  (э. д. с. генератора равна  $\mu U_{mc}$ ).



Фиг. 47. Эквивалентная схема выходного каскада.

*а* — для низших частот; *б* — для высших частот; *в* — для средних частот.

**Эквивалентная схема выходного трансформатора для низших частот.** Для этих частот действием индуктивностей рассеяния можно пренебречь, так как их сопротивление на низших частотах мало по сравнению с сопротивлениями, включенными с ними последовательно. Упрощенная схема выходного каскада для низших частот представлена на фиг. 47, *а*.

Из рассмотрения схемы мы можем сделать следующий вывод. Внутреннее сопротивление лампы  $R_i$  и индуктивность первичной обмотки  $L_1$  образуют делитель напряжения. В силу того что сопротивление индуктивности  $L_1$  переменному току уменьшается с уменьшением частоты, и напряжение, снимаемое с делителя на нагрузку  $R'_H$ , тоже будет уменьшаться. Усиление каскада на низших частотах будет падать.

Для уменьшения западания частотной характеристики на низших частотах индуктивность первичной обмотки  $L_1$  нужно брать по возможности большей. Чем больше будет

индуктивность первичной обмотки  $L_1$ , тем лучше будут усиливаться низкие частоты в выходном каскаде.

Задаваясь величиной коэффициента частотных искажений на низких частотах  $M_n = \frac{K_0}{K_n}$  ( $M_n$  — коэффициент частотных искажений;  $K_0$  — усиление каскада на средних частотах;  $K_n$  — усиление каскада на самой низкой частоте диапазона), мы можем определить необходимую индуктивность первичной обмотки  $L_1$ .

Для однотактной схемы оконечного каскада

$$L_1 = \frac{R_i}{2\pi f_n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}},$$

где  $L_1$  — индуктивность первичной обмотки, *гн*;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы, *ом*;

$f_n$  — наинизшая частота диапазона, *гц*;

$$\alpha = \frac{R'_n}{R_i};$$

$M_n$  — коэффициент частотных искажений на наинизшей частоте диапазона.

Для двухтактной схемы

$$L_1 = \frac{2R_i}{2\pi f_n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}},$$

где  $\alpha = \frac{R'_n}{2R_i}$ ;

$R'_n$  — нагрузка между анодами, *ом*;

$R_i$  — внутреннее сопротивление переменному току одного плеча, *ом*.

**Эквивалентная схема выходного трансформатора для высших частот.** На высших частотах диапазона усиливаемых частот шунтирующим действием индуктивности первичной обмотки  $L_1$  можно пренебречь, так как ее индуктивное сопротивление на высоких частотах много больше индуктивного сопротивления  $L_s$  и активного сопротивления  $R'_n$ . Эквивалентная схема для этого случая представлена на фиг. 47,б.

Рассмотрение этой схемы приводит к следующему выводу. Внутреннее сопротивление лампы  $R_i$ , индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке  $L'_s = L_{s1} + L'_{s2}$  и сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке  $R'_n$ , образуют делитель напряжения. С повышением частоты увеличивается индуктивное сопротивление  $2\pi f L'_s$ , благодаря чему уменьшается напряжение на нагрузке  $R'_n$ . Это значит, что на высших частотах усиление каскада падает. Для уменьшения западания частотной характеристики на высших частотах усиливаемого диапазона нужно уменьшать индуктивность рассеяния трансформатора  $L'_s = L_{s1} + L'_{s2}$ , где  $L'_{s2} = L_{s2} \cdot n^2$ . Уменьшение индуктивности рассеяния достигается тщательностью изготовления выходного трансформатора и применением специальной конструкции его обмоток, о чем будет сказано ниже.

Индуктивность рассеяния  $L'_s$  изготовленного выходного трансформатора можно измерить; для этого нужно замкнуть накоротко концы вторичной обмотки трансформатора и, пользуясь мостом для измерения индуктивностей, измерить индуктивность на концах первичной обмотки. С точностью, вполне достаточной для любительских целей, эта индуктивность может быть принята за индуктивность рассеяния трансформатора, приведенную к первичной обмотке  $L'_s = L_{s1} + L_{s2} \cdot n^2$ .

Зная величину индуктивности трансформатора  $L'_s$ , можно определить коэффициент частотных искажений  $M_\theta$  каскада для высших частот по формуле

$$M_\theta = \frac{K_0}{K_\theta} = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi f_\theta \cdot L'_s}{R'_n + R_i} \right)^2},$$

где  $M_\theta$  — коэффициент частотных искажений для высших частот;

$K_0$  и  $K_\theta$  — коэффициенты усиления на средних и высших частотах;

$f_\theta$  — частота, для которой определяется коэффициент частотных искажений;

$L'_s$  — приведенная величина индуктивности рассеяния, *гн*;

$R'_n$  — приведенная величина анодной нагрузки, *ом*;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы оконечного каскада, *ом*.

Задаваясь величиной допустимых частотных искажений на высших частотах  $M_g$ , можно определить допустимую величину индуктивности  $L'_s$  для проектируемого трансформатора:

$$L'_s = \frac{R'_n + R_l}{2\pi f_g} \sqrt{M_g^2 - 1}.$$

Необходимо еще раз подчеркнуть, что вредность наличия большой индуктивности рассеяния заключается не только в том, что она приводит к частотным искажениям на высших частотах, но и в том, что она создает сдвиг фаз, который особенно ощутим на этих частотах, а это приводит к неустойчивой работе усилителя в области высших частот при применении глубокой отрицательной обратной связи. Между сдвигом фаз и частотными искажениями есть простая зависимость:

$$\cos \varphi_g = \frac{1}{M_g},$$

где  $\cos \varphi_g$  — косинус угла сдвига фазы  $\varphi_g$  на высших частотах;

$M_g$  — коэффициент частотных искажений на высших частотах.

Отношение индуктивности рассеяния трансформатора к величине индуктивности его первичной обмотки называется коэффициентом рассеяния трансформатора; оно является важной характеристикой трансформатора и обозначается буквой  $\sigma_s$ ;  $\sigma_s = \frac{L'_s}{L_1}$ . Для двухтактных усилителей, работающих

в режиме класса АВ<sub>1</sub>, величина  $L'_s$  должна быть не более 0,5% от  $L_1$ . Желательно снижение величины  $\sigma$  до 0,1—0,2%.

**Эквивалентная схема выходного трансформатора для средних частот.** На средних частотах шунтирующее действие  $L_1$  еще достаточно мало; мало также и индуктивное сопротивление  $L'_s$ , поэтому можно пренебречь шунтирующим действием индуктивности первичной обмотки  $L_1$  и действием индуктивности рассеяния  $L'_s$ . Эквивалентная схема окончного каскада с трансформаторным выходом изображена на фиг. 47, в. Рассмотрение этой схемы приводит к выводу, что никаких реактивных элементов она не содержит; поэтому можно считать, что усиление каскада на средних ча-

стотах не зависит от частоты и частотная характеристика каскада в области средних частот линейна и горизонтальна. Коэффициент усиления каскада на средних частотах  $K_0$  находится по формуле

$$K_0 = \frac{\mu}{n} \frac{R'_n}{R'_n + R_i},$$

где  $\mu$  — коэффициент усиления лампы оконечного каскада;  
 $n$  — коэффициент трансформации выходного трансформатора;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы, *ом*;

$R'_n$  — приведенное сопротивление анодной нагрузки, *ом*.

Итак, частотная характеристика оконечного каскада усилителя имеет завал в области низших частот. Этот завал тем меньше, чем больше индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора  $L_1$ .

В области средних частот (800—1 000 *гц*) коэффициент усиления усилителя можно считать постоянным и не зависящим от частоты.

В области высших частот частотная характеристика усилителя имеет западание, обусловливаемое действием индуктивности рассеяния  $L'_s$  выходного трансформатора. Западание частотной характеристики в области высших частот тем меньше, чем меньше индуктивность рассеяния в трансформаторе.

**П р и м е ч а н и е.** Диапазон звуковых частот условно можно разбить на следующие три участка:

1. Низшие частоты — 20 ÷ 400 *гц*.
2. Средние частоты — 400 ÷ 1 500 *гц*.
3. Высшие частоты — 1 500 ÷ 20 000 *гц*.

#### 4. РАСЧЕТ ВЫХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Расчет выходного трансформатора складывается из электрического и конструктивного его расчетов.

**Электрический расчет трансформаторов.** В задачу электрического расчета входит определение электрических параметров трансформатора, а именно:

1. Определение коэффициента трансформации трансформатора  $n$ :

$$n = \sqrt{\frac{\gamma_1 R'_n}{R_n}},$$

где  $R'_n$  — оптимальное сопротивление анодной нагрузки оконечной лампы, *ом*;

$R_n$  — сопротивление нагрузки (сопротивление звуковой катушки динамика переменному току на средних частотах), *ом*;

$\eta$  — к. п. д. выходного трансформатора, равный 0,85—0,9.

2. Определение индуктивности первичной обмотки трансформатора  $L_1$ .

Для однотоковой схемы

$$L_1 = \frac{R_i}{2\pi f} \frac{\alpha}{\alpha + 1} \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}}.$$

Для двухтактной схемы

$$L_1 = \frac{2R_i}{2\pi f_n} \frac{\alpha}{\alpha + 1} \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}}.$$

Здесь  $L_1$  — *гн*;

$R_i$  — *ом*;

$f_n$  — наименьшая частота усиливаемого диапазона, *гц*;

$\alpha = \frac{R'_n}{R_i}$  — для однотоковой и  $\alpha = \frac{R'_n}{2R_i}$  — для двухтактной схемы;

$M_n = \frac{K_0}{K_n}$  — коэффициент частотных искажений на самой низкой частоте усиливаемого диапазона.

3. Определение допустимой индуктивности рассеяния:

$$L'_s = \frac{R'_n + R_i}{2\pi f_s} \sqrt{M_s^2 - 1},$$

где  $L'_s$  — индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке, *гн*;

$f_s$  — высшая частота усиливаемого диапазона, *гц*;

$M_s = \frac{K_0}{K_s}$  — коэффициент частотных искажений на высшей частоте  $f_s$ , равный отношению коэффициента усиления  $K_0$  каскада на средних частотах к коэффициенту усиления  $K_s$  на высшей частоте.

Для двухтактного усилителя, работающего в режиме класса АВ<sub>1</sub>,  $L'_s$  не должно превышать 0,5% от  $L_1$ . В хороших выходных трансформаторах  $L'_s$  составляет 0,1—0,2% от  $L_1$ .

При более строгом электрическом расчете трансформатора определяют допустимое сопротивление его первичной и вторичной обмоток и к. п. д. трансформатора ( $\eta$ ). Для любительских расчетов эти величины можно не определять, задавшись величиной  $\eta = 0,85—0,9$ .

**Конструктивный расчет трансформатора.** Задачей конструктивного расчета трансформатора является определение его конструктивных данных, которые обеспечили бы выполнение электрических требований ( $n$ ,  $L_1$  и  $L'_s$ ), найденных в результате электрического расчета.

Необходимо заметить, что точный конструктивный расчет трансформатора является довольно сложным делом. Расчет обычно производится путем последовательных приближений, и лишь после нескольких предварительных расчетов удастся получить конструктивные данные, которые обеспечили бы выполнение нужных нам электрических параметров. Расчет трансформаторов, работающих с постоянным подмагничиванием, отличается от расчета трансформаторов, не имеющих постоянного подмагничивания. К первым относятся трансформаторы в одноктактных, ко вторым — трансформаторы, работающие в двухтактных схемах.

Здесь мы приведем упрощенный расчет выходного трансформатора, работающего в режиме отсутствия постоянного подмагничивания. Радиолюбители, желающие рассчитать выходной трансформатор для одноктактного каскада, могут это сделать, пользуясь неоднократно помещавшимися статьями в радиолюбительских журналах и брошюрах.

Первым этапом расчета трансформатора является определение нужного объема стали сердечника трансформатора. Объем стали может быть определен по упрощенной формуле

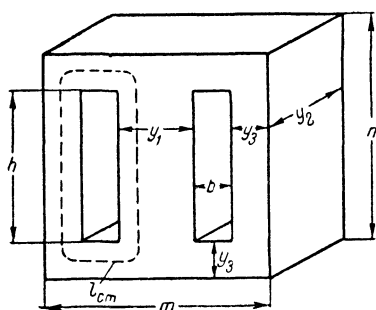
$$V_c = \frac{1,26 \cdot 10^6}{L_1 \cdot f_n^2},$$

где  $V_c$  — объем стали, см<sup>3</sup>;

$L_1$  — индуктивность первичной обмотки, найденная из электрического расчета трансформатора, гн;

$f_n$  — низшая частота усиливаемого диапазона, гц.

Определив объем стали  $V_c$ , нужно подобрать подходящий тип стандартных пластин, набор которых позволил бы обеспечить необходимую величину  $V_c$ . На фиг. 48 показаны основные размеры сердечника броневых типа, которыми следует пользоваться при конструктивном расчете трансформатора. Броневой тип сердечника наиболее удобен для изготовления выходных трансформаторов в любительских усилителях.



Фиг. 48. Сердечник броневых типа.

В табл. 1 приведены основные размеры стандартных пластин, которыми можно пользоваться при выборе сердечника.

Таблица 1

Тип пластины	Размеры, мм									Наивыгод- нейший объем, см <sup>3</sup>
	$y_1$	$l_c$	$b$	$h$	$Q_{0k} = bh$	$m$	$n$	$y_3$	Толщина пластины	
Ш-15	15	177	17	49	833	70	70	10,5	0,35	35—72
Ш-19	19	178	17	46	782	75	68	11	0,35	58—116
Ш-20	20	207	18	56	1 010	82	82	13	0,35	83—166
Ш-25	25	240	25	60	1 500	105	90	15	0,35	165—330
Ш-30	30	285	25	80	2 000	110	110	15	0,35	230—460

Таблица дает возможность подобрать подходящий тип пластин, зная объем стали  $V_c$ .

Выбрав тип пластин, определяем толщину набора сердечника  $y_2$ :

$$y_2 = \frac{V_c}{f_c \cdot l_c \cdot y_1},$$

где  $l_c$  — средняя длина магнитной силовой линии в стали, см;

$y_1$  — ширина средней части сердечника, см;

$f_c$  — коэффициент, учитывающий неплотность набивки пластин сердечника (так называемый коэффициент заполнения стали).



Для пластин толщиной 0,35 мм  $f_c=0,9$ . Набор пластин  $y_2$  нужно брать не более  $2y_1$ . Если для получения требуемой величины  $V_c$  потребуется толщина набора, большая  $2y_1$ , то следует взять больший размер пластины.

Далее определяем сечение сердечника  $Q_c$ :

$$Q_c = y_1 \cdot y_2 \cdot f_c.$$

Затем определяем число витков первичной обмотки  $w_1$

$$w_1 = 426 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_c}{Q_c}},$$

где  $L_1$  — индуктивность первичной обмотки, гн;

$l_c$  — средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике, см;

$Q_c$  — сечение сердечника, см<sup>2</sup>.

В выходном трансформаторе для двухтактного каскада первичная обмотка должна иметь отвод от ее середины для присоединения к положительному полюсу анодного напряжения.

Определяем число витков вторичной обмотки  $w_2$ :

$$w_2 = \frac{w_1}{n},$$

где  $n$  — коэффициент трансформации трансформатора.

Определяем сечение провода  $q_1$ , который может быть применен нами для намотки первичной обмотки. Расчет ведется, исходя из допустимой плотности тока в первичной обмотке 2 а/мм<sup>2</sup>.

$$q_1 = \frac{I_{a0}}{2},$$

где  $q_1$  — сечение провода, мм<sup>2</sup>;

$I_{a0}$  — величина постоянной составляющей анодного тока (одной лампы), а.

Определяем диаметр провода первичной обмотки:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{q_1},$$

где  $d_1$  — диаметр провода первичной обмотки, мм.

Диаметр провода вторичной обмотки  $d_2$  определяется по формуле

$$d_2 = d_1 \cdot \sqrt{n}.$$

Подобрав провода подходящего диаметра, необходимо ориентировочно определить, разместятся ли обмотки в окне сердечника. Для этого нужно подсчитать сечение, занимаемое обеими обмотками,—так называемое сечение меди  $Q_m$ :

$$Q_m = \frac{w_1 \cdot q_1}{f_{1m}} + \frac{w_2 \cdot q_2}{f_{2m}} \text{ см}^2,$$

где  $w_1$  и  $w_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток;

$q_1$  и  $q_2$  — сечения проводов первичной и вторичной обмоток, мм<sup>2</sup>;

$f_{1m}$  и  $f_{2m}$  — коэффициенты заполнения медью, учитывающие неплотность намоток, изоляцию между слоями и вид изоляции провода.

Ориентировочные значения  $f_m$  можно определить, пользуясь табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Изоляция и диаметр провода	Коэффициент заполнения
Эмаль (ПЭ) . . . . .	0,25—0,15
Двойная шелковая (ПШД) . . . . .	0,2—0,1
Двойная бумажная (ПБД) . . . . .	0,12—0,09

Если в результате расчета окажется, что  $Q_m$  меньше или равно площади окна  $Q_{ок}$  (табл. 1), то обмотка должна разместиться в выбранном сердечнике. Если же окажется, что  $Q_m > Q_{ок}$ , то нужно выбрать пластины с большей площадью окна или увеличить объем стали и уменьшить число витков. Трансформатор в этом случае нужно пересчитать снова.

Необходимо еще учесть, что полезная площадь окна уменьшается каркасом трансформатора; поэтому лучше определять площадь окна, измеряя ее по готовому каркасу. Уменьшают плотность намотки и выводы, которые неизбежно приходится делать во всяком трансформаторе.

Несколько слов необходимо сказать об изоляции между обмотками и о прокладках между слоями обмотки. При

анодном напряжении до 250 в толщина изоляции между обмотками должна быть 0,5 ÷ 0,7 мм, при напряжении до 500 в — 1 ÷ 1,5 мм.

Толщина прокладок между слоями обмотки при диаметре провода 0,1 ÷ 0,15 мм должна быть порядка 0,05 мм, при диаметре 0,4 ÷ 0,6 мм — около 0,15 мм.

На этом конструктивный расчет трансформатора заканчивается.

## 5. КОНСТРУКЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ВЫХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мы познакомились с методом приближенного расчета трансформатора. Приведенные выше упрощенные формулы дают возможность определить конструктивные размеры сердечника, число витков первичной и вторичной обмоток. В заключение познакомимся с конструктивным выполнением обмоток выходного трансформатора.

Мы уже знаем о том, что индуктивность рассеяния трансформатора должна быть сведена к минимуму. Чем меньше индуктивность рассеяния, тем меньше частотные искажения на высших частотах в усилителе и тем более глубокую обратную связь мы можем получить в нем.

Существует испытанный метод, приводящий к уменьшению индуктивности рассеяния трансформатора. Этот метод заключается в секционировании первичной и вторичной обмоток трансформатора. Различают два вида секционирования обмоток: дисковое (или галетное) и цилиндрическое (или слоевое).

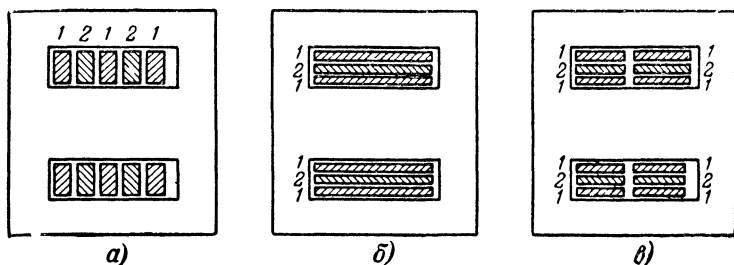
При дисковом секционировании (фиг. 49,а) обмотки разбиваются на несколько самостоятельных секций (галет), расположенных вдоль сердечника; секции первичной и вторичной обмоток чередуются между собой. Этот способ секционирования уменьшает распределенную емкость обмоток и индуктивность рассеяния и применяется главным образом во входных и междупламповых трансформаторах.

При цилиндрическом секционировании (фиг. 49,б) первичная и вторичная обмотки разбиваются на ряд слоев, чередующихся между собой при намотке. Этот вид секционирования проще при намотке и снижает индуктивность рассеяния.

К высококачественному выходному трансформатору, предназначенному для работы в двухтактной схеме, предъ-

являются требования высокой степени симметричности его плеч. Для удовлетворения этого требования нужно комбинировать галетное и дисковое секционирование. Практически такой трансформатор выполняется следующим образом (фиг. 49, в).

Каркас, предназначенный для намотки, делят пополам при помощи перегородки. В первой секции каркаса размещается половина обмоток, относящаяся к одному плечу схемы; во второй секции — половина, относящаяся к другому плечу. Намотка в каждой половине каркаса выпол-



Фиг. 49. Секционирование обмоток.

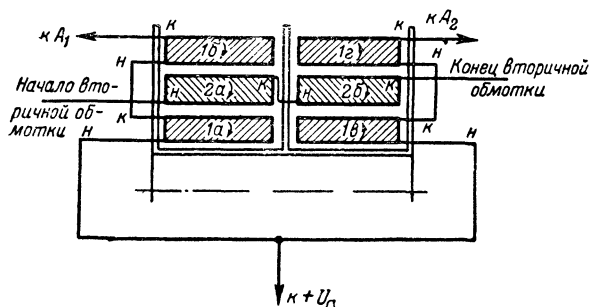
*а* — дисковое секционирование; *б* — цилиндрическое секционирование; *в* — смешанное секционирование.

няется в следующей последовательности. Число витков первичной обмотки делится на четыре части. В одну из секций каркаса укладывается первая четверть первичной обмотки (при этом следует заметить стороны каркаса во избежание ошибок при дальнейшей намотке). Начало и конец этой секции выводят через щечку каркаса наружу. Затем снимают каркас со станка и переворачивают его. Во вторую секцию каркаса наматывается вторая четверть первичной обмотки (направление намотки противоположно направлению витков первой четверти). Оба конца второй четверти обмотки также выводятся наружу через противоположную щечку каркаса.

После этого каркас устанавливают на станке в первоначальное положение и в обе половины каркаса наматывают вторичную обмотку так, чтобы в каждой половине каркаса уложилось по половине витков вторичной обмотки. Начало вторичной обмотки выводится через левую щечку каркаса. В левой половине каркаса наматывается первая половина вторичной обмотки, затем провод пропускается через прорезь в перегородке, и намотка продолжается в том же направлении во второй половине каркаса, после

чего конец обмотки выводится наружу через правую щечку каркаса. По окончании намотки вторичной обмотки заканчивают размещение двух оставшихся четвертей первичной обмотки в том же порядке, как это делалось вначале.

На фиг. 50 показана схема соединения секций обмоток. К намотке и соединению секций нужно отнестись очень внимательно, чтобы не допустить ошибок. Слой обмотки следует изолировать от следующего одним слоем папиросной или конденсаторной бумаги. Секции изолируются друг от друга тремя слоями бумаги или лакотканью.



Фиг. 50. Схема соединений секций выходного трансформатора (стрелками показано направление намотки).

Трансформатор, выполненный указанным выше способом, обладает хорошей симметричностью и имеет коэффициент рассеяния  $\sigma$ , порядка 0,002, что позволяет применять его в усилителях с довольно глубокой отрицательной обратной связью.

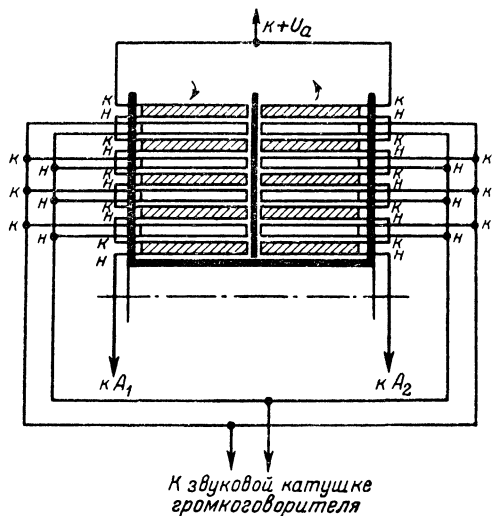
На фиг. 51 изображена схема секционирования другого, более сложного выходного трансформатора. Такое секционирование дает возможность получить высококачественный трансформатор, позволяющий осуществить весьма глубокую обратную связь в усилителе, охватывающую до 4 каскадов. Схема такого усилителя приведена в гл. 6.

Намотка выполняется на каркасе, разделенном на две равные части перегородкой. Все секции первичной и вторичной обмоток, размещенные в первой половине каркаса, наматываются в одном направлении, а секции, размещаемые во второй половине каркаса, — в противоположном направлении.

Первичная обмотка делится на 10 секций, равные по количеству витков, а вторичная — на 8 секций. В каждой

половине каркаса размещается по 5 секций первичной обмотки и 4 — вторичных, чередующихся при намотке между собой. Намотка в каждой половине каркаса начинается с секции первичной обмотки.

Практически намотку следует выполнять следующим образом: сначала производится намотка всех секций, заполняющих левую часть каркаса, затем каркас снимается со станка и переворачивается, после чего в той же последовательности заполняется вторая половина каркаса.



Фиг. 51. Схема соединений многосекционного выходного трансформатора (стрелками показано направление намотки).

На фиг. 51 показана схема соединения секций. Все 5 секций первичной обмотки, расположенные на одной половине каркаса, соединяются между собой последовательно, т. е. конец первой секции соединяется с началом второй и т. д. Конец пятой (наружной) секции выводится наружу и соединяется с концом наружной секции, расположенной на другой половине каркаса. Точка соединения наружных секций образует среднюю точку первичной обмотки трансформатора для присоединения к положительному полюсу выпрямителя.

Соединения секций первичной обмотки в левой и правой половинах каркаса аналогичны.

Начало первой (считая от сердечника) секции первичной обмотки одной половины каркаса и начало первой секции другой половины каркаса присоединяются к анодам ламп оконечного каскада усилителя. Для уменьшения количества выводимых наружу проводов соединения между секциями первичной обмотки можно делать внутри каркаса; при этом нужно обратить внимание на качество изоляции соединительного провода во избежание пробоя между первичной и вторичной обмотками при работе усилителя.

Секции вторичной обмотки могут соединяться различными способами, что дает возможность осуществить выход на различные сопротивления нагрузки. На фиг. 51 все секции, расположенные на первой и второй половинах каркаса, соединены параллельно, что обеспечивает наиболее низкоомный выход. При расчете трансформатора можно так подобрать числа витков в каждой секции вторичной обмотки, что параллельное соединение всех секций обеспечит возможность работы усилителя на низкоомную нагрузку (скажем, 2 ом), а последовательное соединение тех же секций — на высокоомную. Соединяя секции вторичной обмотки в различных комбинациях, мы получаем возможность подключать к усилителю нагрузки, имеющие различное сопротивление.

## *Глава пятая*

### **ФОН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В УСИЛИТЕЛЕ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ**

подавляющее большинство современных высококачественных усилителей питается от сети переменного тока. Для питания цепей накала ламп усилителя, как правило, применяется переменный ток. Анодные цепи питаются постоянным током, полученным от выпрямления переменного напряжения сети

На выходе усилителя, питающегося от сети переменного тока, всегда в той или иной степени прослушивается фон переменного тока, выражающийся в гудении, тон которого равен частоте сети или удвоенной ее частоте. Наличие фона сильно снижает художественное впечатление от прослушивания передаваемой программы, поэтому в задачу конструирования высококачественного усилителя входит снижение фона до такой величины, при которой он практически не замечается нашим ухом.

Напряжение фона или пульсации на выходе высококачественного усилителя должно быть по крайней мере на 20 дБ ниже уровня минимального полезного сигнала.

В чем же причины появления фона на выходе усилителя? Таких причин может быть несколько; мы рассмотрим основные из них и меры борьбы с ними.

## 1. ПУЛЬСАЦИИ АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Первой причиной фона является недостаточное сглаживание пульсации выпрямленного напряжения в фильтре выпрямителя.

Питание анода лампы усилителя плохо отфильтрованным напряжением ведет к тому, что кроме постоянного падения напряжения на сопротивлении анодной нагрузки, будет также и переменное, которое через переходной конденсатор попадет на сетку следующего каскада усилителя и будет им усилено. Отсюда видно, что наиболее чувствительны к пульсации напряжения предварительные каскады усилителя, в особенности его первый каскад.

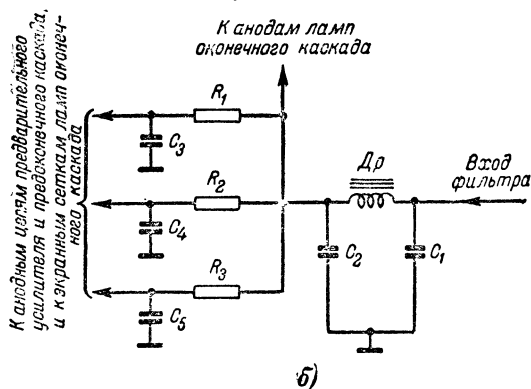
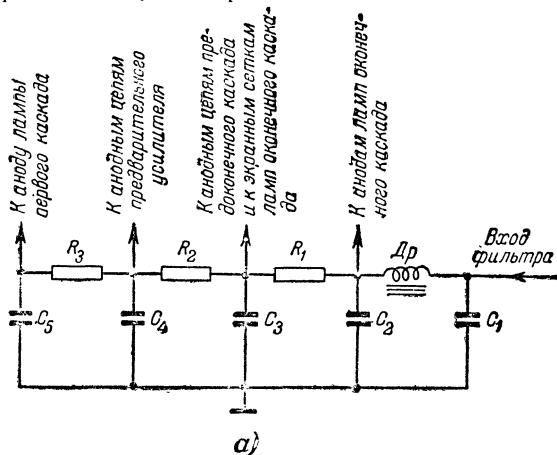
Следует отметить, что пентоды и лучевые тетроды мало чувствительны к пульсации анодного напряжения и более чувствительны к пульсации напряжения на экранной сетке. Это обстоятельство нужно иметь в виду при проектировании усилителей, в которых применяются пентоды или лучевые тетроды. Так, например, в оконечных каскадах, работающих на пентодах или лучевых тетродах, питание анодов целесообразно брать после первого звена фильтра, а питание экранных сеток — после второго звена.

Процентное отношение амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения к величине постоянной составляющей называется коэффициентом пульсации. Максимально допустимый коэффициент пульсации не одинаков для различных каскадов усилителя. Так, для анодного напряжения первого каскада усилителя, работающего от граммофонного звукоснимателя, он равен 0,01—0,05 %, для анодного напряжения однотактного выходного каскада — 0,1—0,3 %, для напряжения на экранной сетке этого же каскада — 0,05—0,1 %. Коэффициент пульсации анодного напряжения в двухтактных оконечных каскадах можно допускать до 0,5—2 %.

На фиг. 52,а изображена типичная схема сглаживающего фильтра, применяющегося в высококачественных усилителях. Аноды оконечного каскада, как наименее чувствительные к пульсации анодного напряжения, подключаются



к выходу первого звена фильтра, образованного конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$  и дросселем  $Др$ . Емкость конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  обычно берется порядка 8—18 мкф, а индуктивность дросселя  $Др$  — порядка 10 гн. Обмотка дросселя



Фиг. 52. Схемы фильтров для выпрямителей высококачественных усилителей.

а — схема с последовательными звеньями; б — схема с параллельными звеньями.

должна быть рассчитана на пропускание анодного тока, потребляемого всеми каскадами усилителя, с учетом токов, расходуемых на делителях напряжения.

К выходу второго звена фильтра ( $R_1C_3$ ) присоединяется анодная цепь предоконечного или фазопереворачивающего каскада и экранные сетки оконечных пентодов или

тетродов. Иногда для получения лучшего сглаживания пульсаций вместо сопротивления  $R_1$  применяется дроссель, индуктивность которого берется порядка 15—30 *гн*.

В зависимости от общего коэффициента усиления усилителя и требований к сглаживанию пульсации фильтр выпрямителя может содержать еще одно или два звена (сопротивления  $R_2$ ,  $R_3$  и конденсаторы  $C_4$ ,  $C_5$ ). Емкости конденсаторов  $C_3$ ,  $C_4$  и  $C_5$  — выбираются порядка 10—18 *мкф*. Величины сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  зависят от допустимого падения напряжения на них, что в свою очередь зависит от тока, потребляемого каждым каскадом. Обычно величина  $R_1$  выбирается порядка 2 000 ÷ 5 000 *ом*,  $R_2$  — 5 000 ÷ 10 000 *ом* и  $R_3$  — 15 000 ÷ 20 000 *ом*.

На фиг. 52,б изображена другая, менее распространенная схема фильтра. В отличие от предыдущей в этой схеме сопротивления фильтров ( $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ) присоединяются к выходу первого звена фильтра не последовательно, а параллельно.

Применение правильно сконструированного фильтра позволяет свести фон переменного тока на выходе усилителя к ничтожной величине.

## 2. НАВОДКИ ОТ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Второй причиной появления фона в усилителе являются наводки от цепей переменного тока на сеточные цепи усилителя (особенно на цепи его первых каскадов). Источником наводки могут быть: силовой трансформатор, дроссель фильтра, длинный провод, подводящий переменное напряжение (цепь накала, провод, идущий через выключатель и предохранитель к силовому трансформатору) в том случае, когда эти детали или провода находятся на близком расстоянии от цепей сетки первых каскадов усилителя.

В этом случае можно рекомендовать следующие общие меры:

1. Силовой трансформатор и дроссель фильтра должны быть удалены на возможно большее расстояние от проводов, связанных с сетками первого и второго каскадов усилителя, а также от самих ламп этих каскадов и выходного трансформатора. Оси симметрии силового трансформатора и дросселей фильтра по возможности должны быть перпендикулярны.

2. Провода, входящие в цепь сетки первого и второго каскадов усилителя, должны быть экранированы и проходить подальше от проводов, несущих переменный ток.

3. Все экраны проводов должны быть заземлены. Заземлять нужно один конец экранирующей оболочки провода. Сердечники силового трансформатора, дросселей и выходного трансформатора также должны быть заземлены.

4. Цепи сетки нужно выполнять по возможности более короткими проводами.

5. Не пользоваться корпусом усилителя в качестве соединительных проводов заземления.

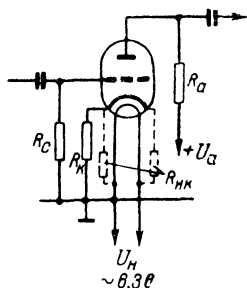
6. Заземление желательно выполнять в виде специальной шины, в одной точке соединенной с корпусом усилителя и гнездом земли; эту точку лучше располагать ближе к первым каскадам усилителя. Точки схемы, которые должны быть заземлены, нужно соединять с шиной земли возможно более короткими проводами.

### 3. ПИТАНИЕ НАКАЛА ЛАМП ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

Нить лампы, питаемая переменным током, часто является источником фона в усилителе и особенно в первых его каскадах. Здесь нет необходимости подчеркивать, что в настоящее время в усилителях, питаемых от сети переменного тока, применяются только подогревные лампы (исключение составляют некоторые типы оконечных ламп, которые имеют нить прямого накала).

Рассмотрим причины, вызывающие появление фона вследствие питания нити накала подогревных ламп переменным током.

Основной причиной является наличие тока утечки между катодом и подогревателем (нитью) лампы вследствие несовершенства изоляции между ними. Из рассмотрения схемы фиг. 53 видно, что между катодом и незаземленным концом нити через сопротивление  $R_{нк}$  (утечки между нитью и катодом) приложено переменное напряжение, амплитуда которого равна амплитуде напряжения накала. Вследствие наличия этого напряжения и утечки между нитью и катодом по цепи  $R_{нк}$  — катод —  $R_k$  потечет переменный ток, который замкнется через сопротивление  $R_k$  на заземленный конец нити накала. Прохождение переменного тока по сопротивлению  $R_k$  является причиной появления на его концах переменного напряжения, величина которого



Фиг. 53. Схема, поясняющая появление фона вследствие утечки между нитью лампы и катодом.

тем больше, чем больше напряжение накала, чем больше сопротивление  $i_{\kappa}$  и чем хуже изоляция между подогревателем и нитью накала. Переменное напряжение на концах сопротивления  $R_{\kappa}$  действует между катодом лампы и ее сеткой (через сопротивление  $R_c$ ), усиливается этой лампой и попадает на сетку следующего каскада. Усиленное затем всеми каскадами, это напряжение проявляется в виде фона на выходе усилителя. Фон на выходе усилителя будет, в конечном итоге, тем сильнее, чем большее усиление он дает после лампы, являющейся причиной фона. Отсюда ясно, что наибольшее влияние в образовании фона имеет лампа первого каскада усилителя.

Для того чтобы уменьшить фон, являющийся следствием утечки между нитью и катодом лампы, нужно уменьшать напряжение между концом нити и катодом. Этого можно достигнуть заземлением средней точки накальной обмотки силового трансформатора. Совершенно очевидно, что в этом случае мы уменьшаем переменное напряжение между нитью и катодом в два раза. Кроме того, при этом напряжения на концах нити будут в противофазе, и токи через сопротивление  $R_{\kappa}$  будут частично взаимно компенсироваться.

В случае отсутствия средней точки на накальной обмотке трансформатора и невозможности ее сделать, можно применить заземление цепи накала через потенциометр сопротивлением 100—200 ом. Концы потенциометра присоединяются к концам накальной обмотки, а движок его соединяется с землей. Наиболее правильное положение движка потенциометра находится по минимуму фона на выходе усилителя.

Другой причиной появления фона в усилителе вследствие питания накала ламп переменным током является наличие емкости между нитью накала и сеткой лампы. В этом случае, так же, как и в предыдущем, помогает заземление цепи накала через среднюю точку накальной обмотки или через потенциометр. Иногда фон уменьшается при перемене заземленного конца нити. Эта причина сказывается значительно реже предыдущей.

Третьей причиной фона при питании нити накала переменным током является наличие тока эмиссии между нитью лампы и ее катодом. Катод лампы обычно находится под некоторым положительным потенциалом относительно ее нити (при автоматическом катодном смещении на сетку) и является, таким образом, анодом для нити. Уменьшить

величину фона в этом случае можно подачей некоторого положительного напряжения на нить накала. Это легко сделать при помощи делителя напряжения, включенного между положительным и отрицательным полюсами выпрямителя (фиг. 54). Нужное напряжение находится по минимому фона на выходе усилителя, но не должно превышать 40 в.

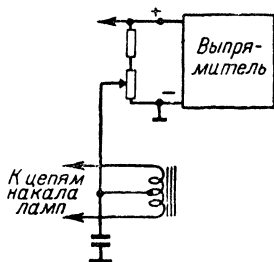
Для более эффективного снижения пульсации целесообразно нити накала ламп первых двух каскадов питать постоянным током, который можно получить от специального небольшого селенового выпрямителя, собранного по мостовой схеме. Для фильтра такого выпрямителя можно применить низковольтные электролитические конденсаторы большой емкости (от 100 до 3 000 мкф).

Мы рассмотрели основные причины появления фона в усилителе и меры борьбы с ним. Необходимо заметить, что иногда бывает довольно трудно обнаружить источник фона. Тогда радиолюбителю приходится вооружаться терпением и настойчиво, шаг за шагом проверять все каскады усилителя.

Прежде чем приступать к поискам причин фона в самом усилителе, нужно проверить, не поступает ли он на вход усилителя. Для этого достаточно накоротко замкнуть вход усилителя. Если фон не исчезнет, то источник его находится в усилителе.

Далее нужно попробовать увеличить емкость фильтра выпрямителя присоединением параллельно к его конденсаторам дополнительного конденсатора. Если это помогает, то нужно улучшить фильтрацию увеличением емкости или, если возможно, увеличением сопротивления фильтра. Если в фильтре применен дроссель, то можно заменить его другим, имеющим большую индуктивность.

Если увеличение емкости фильтра совершенно не уменьшает фона на выходе, то нужно искать другие его причины. Прежде всего нужно проверить, нет ли наводок переменного напряжения на сеточные цепи. Для этого нужно пробовать поочередно заземлять сетки ламп всех каскадов усилителя, начиная с оконечного. Если окажется, что при заземлении сеток оконечного каскада фон исчезает, то это



Фиг. 54. Схема подачи положительного смещения на нить накала.

указывает на то, что источник его находится в предыдущих каскадах.

Повторяя такой прием, мы дойдем до такого места усилителя, в котором при замыкании на землю одного конца провода, соединенного с сеткой лампы, фон будет исчезать, а при замыкании на землю другого его конца, соединенного с переходной емкостью или с регулятором громкости, фон будет сохраняться. Это укажет на то, что именно на этот провод наводится переменное напряжение, и он является причиной фона в усилителе. Обнаружив место наводки, нужно для устранения ее попробовать экранировать провод или, отогнув его, найти более выгодное его положение, где наводка будет меньше. Если и это не поможет, то нужно изыскивать возможность отнесения самого источника наводки, которым может оказаться силовой трансформатор или провод, несущий переменное напряжение.

В том случае, если при проверке окажется, что источником фона не являются ни первая, ни вторая из разобранных нами причин, то нужно попробовать поменять заземленную точку накала, заземлить цепь накала через потенциометр или подать положительное смещение в цепь накала, как это было описано выше.

## *Глава шестая*

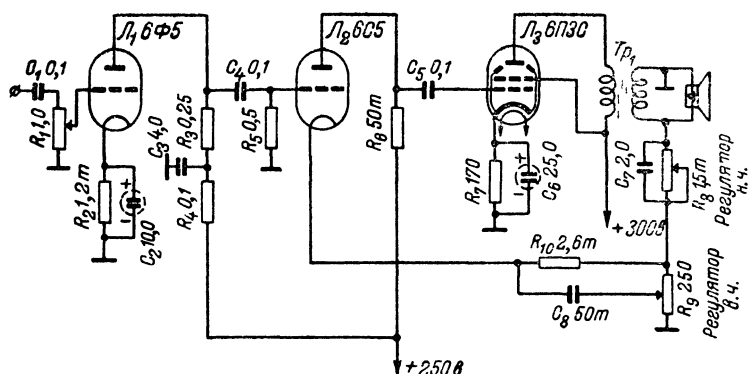
# **ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

## **1. ОДНОТАКТНАЯ СХЕМА**

На фиг. 55 приведена сравнительно простая схема однотоктного усилителя с регулированием тона при помощи частотно зависимой отрицательной обратной связи. Эта схема хорошо работает и может быть применена в качестве низкочастотной части приемника, а также для воспроизведения грамзаписи.

В усилителе три каскада. Второй и третий каскады усилителя охвачены отрицательной обратной связью, подаваемой со вторичной обмотки выходного трансформатора *Tr* на катод лампы 6С5. Обратная связь подается через цепи регулирования тона, ослабляющие обратную связь на тех участках диапазона, которые желательно подчеркивать. Переменное сопротивление  $R_8$  служит для регулирования низших, а  $R_9$ —для регулирования высших частот (подробное описание этого метода регулирования приведено в гл. 2).

Сопротивление  $R_4$  и конденсатор  $C_3$  уменьшают пульсацию анодного напряжения первого каскада.



Фиг. 55. Принципиальная схема простого высококачественного одноконтурного усилителя низкой частоты.

Допустимая мощность рассеяния сопротивлений  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_6$  — 1 вт;  $R_7$  — 2 вт остальных — 0,25 вт.

Стабильность работы усилителя во многом зависит от качества выполнения выходного трансформатора. Коэффициент его трансформации рассчитывается в соответствии с сопротивлением звуковой катушки громкоговорителя. Приведенное сопротивление анодной нагрузки  $R'_a$  должно быть равно 2500 ом.

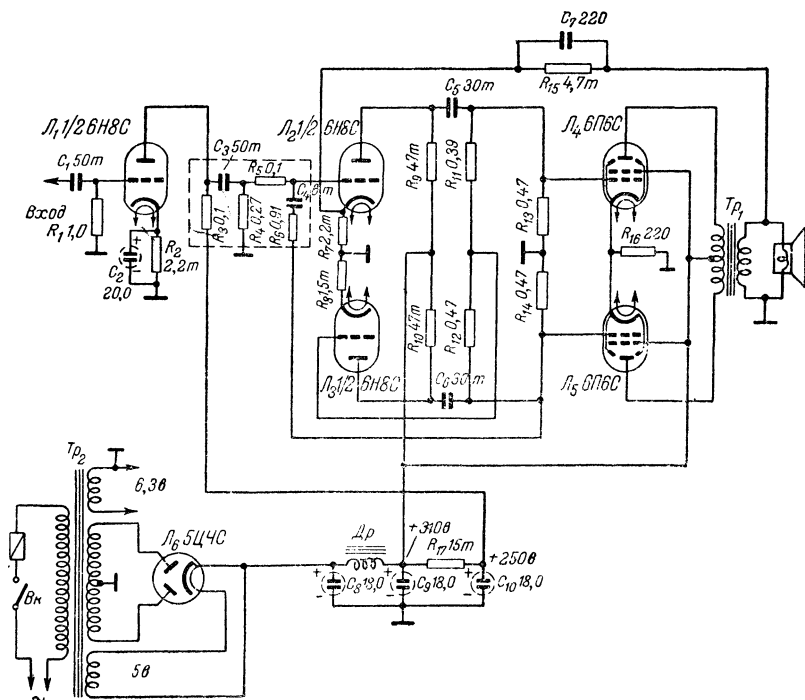
## 2. СХЕМА ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ И ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

На фиг. 56 приведена схема несложного высококачественного усилителя, собранного по двухтактной схеме. Особенностью схемы является комбинированное применение отрицательной и положительной обратной связи.

Отрицательная связь подается со вторичной обмотки выходного трансформатора  $Tr_1$  на катод триода  $L_2$ , являющегося первой лампой фазоперевертывающего каскада. Положительная обратная связь подается с сетки лампы  $L_5$  через сопротивление  $R_6$  и конденсатор  $C_4$  на сетку лампы  $L_2$ . Сопротивление  $R_6$ , конденсатор  $C_4$ , сопротивления  $R_5$  и  $R_4$ , конденсатор  $C_3$  и сопротивление  $R_3$ , а также внутреннее сопротивление лампы  $L_1$  являются сложным делителем напряжения, с которого положительная обратная связь подается на сетку лампы  $L_2$ .

Применение положительной обратной связи позволяет

компенсировать уменьшение усиления, получающееся за счет отрицательной связи. Кроме того, увеличение усиления в цепи обратной связи позволяет получить от схемы



Фиг. 56. Принципиальная схема усилителя с комбинированной обратной связью.

Допустимая мощность рассеяния сопротивлений  $R_3, R_9, R_{10}$  и  $R_{17} - 1$  вт;  $R_{16} - 2$  вт; остальных — 0,25 вт.

результаты, эквивалентные отрицательной обратной связи в 25 дБ. Такая глубокая обратная связь обеспечивает усиление с очень малыми нелинейными искажениями.

В табл. 3 приведены значения коэффициента нелинейности в усилителе для второй и третьей гармоник на частоте 400 гц при выходной мощности 8 вт для  $R'_n = 10\,000\,ом$ .

Из табл. 3 видно, как уменьшаются нелинейные искажения при введении положительной обратной связи.

Положительная обратная связь в схеме рассчитана таким образом, чтобы при отключенной отрицательной связи усилитель был на грани самовозбуждения или даже слегка генерировал.



Таблица 3

Номер гармоники	Коэффициент нелинейности, %		
	Без обратной связи	С отрицательной обратной связью	С положительной и отрицательной обратной связью
2	1,4	0,3	0,2
3	7,0	2,4	0,24

В окончательном каскаде усилителя применены две лампы типа 6П6С. В фазоперевертывающем каскаде, собранном по самобалансирующейся схеме, работает двойной триод типа 6Н8С. В первом каскаде может быть применена половинка лампы 6Н8С или какой-либо другой триод с параметрами, близкими к параметрам 6Н8С.

Усилитель, собранный по этой схеме, при соблюдении величин, указанных в схеме, работает очень хорошо. Все налаживание его сводится к проверке монтажа, установлению нужного режима ламп (напряжений  $+310$  и  $+250$  в) и правильному включению концов вторичной обмотки выходного трансформатора. Выходная мощность 8 вт получается при подаче на вход напряжения 0,1—0,2 в (усиление 30—35 дб). Частотная характеристика усилителя практически линейна в диапазоне частот 30—15 000 гц.

Данные выходного трансформатора для громкоговорителя с сопротивлением звуковой катушки 4 ом следующие: сечение сердечника  $20 \times 40$  мм; первичная обмотка 4 000 витков провода ПЭ 0,18—0,2, разделенных на 4 секции по 1 000 витков; вторичная обмотка — 88 витков ПЭ 0,8—1,0; схема намотки показана на фиг. 50 (стр. 95).

В том случае, если сопротивление звуковой катушки будет отличаться от указанного, данные вторичной обмотки выходного трансформатора необходимо изменить для получения приведенного сопротивления анодной нагрузки  $R'_n = 10\,000$  ом. При этом нужно заново подобрать величины сопротивлений  $R_7$  и  $R_{15}$ , являющихся делителем для напряжения отрицательной обратной связи. Для катодной цепи лампы  $L_2$  эти сопротивления являются сопротивлением автоматического смещения и включены параллельно, поэтому при подборе их величин нужно соблюдать одно условие, а именно при параллельном включении их общее сопротивление должно быть равным 1 500 ом.

В данном усилителе регулирование тона не предусмотрено и должно выполняться в специальном каскаде, вклю-

чаемом перед усилителем и собранном по одной из описанных в гл. 2 схем или по какой-либо другой схеме.

Питание усилителя осуществляется от выпрямителя, собранного на лампе 5Ц4С. Каждая половина вторичной обмотки силового трансформатора должна быть рассчитана на напряжение 270 в при токе нагрузки порядка 70—80 ма. Дроссель фильтра должен иметь индуктивность порядка 15 гн при токе 70—80 ма.

### 3. ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ГЛУБОКОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

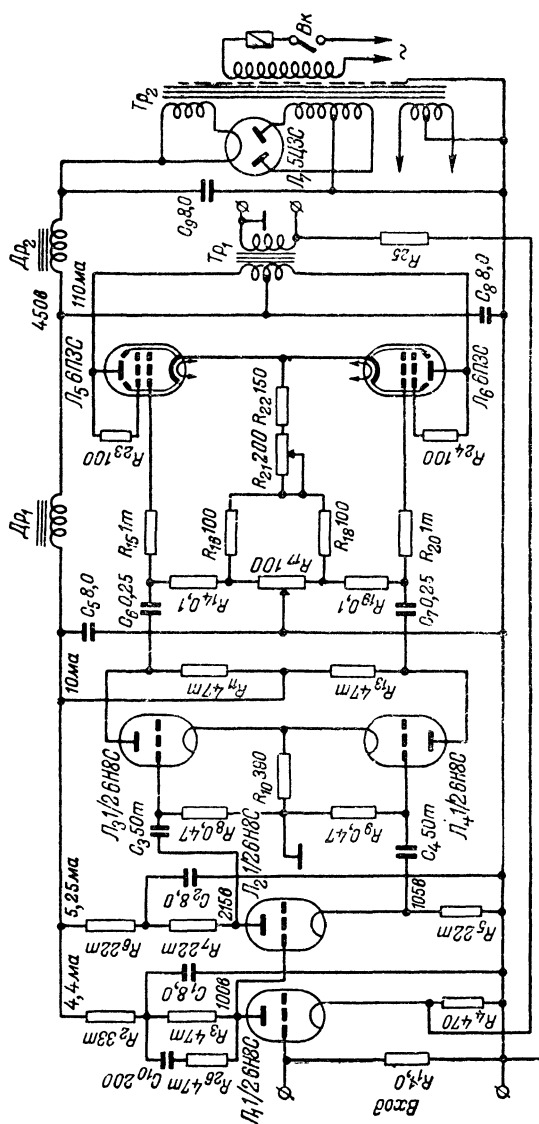
Схема. На фиг. 57 приведена схема высококачественного усилителя, обладающего чрезвычайно широкой полосой усиливаемых частот (20—20 000 гц) и весьма малыми нелинейными искажениями (0,1—1%).

Усилитель имеет 4 каскада усиления, охваченных отрицательной обратной связью.

Обратная связь подается со вторичной обмотки выходного трансформатора  $Tr_1$  на катод лампы,  $L_1$  первого каскада усилителя. Связь между первым и вторым каскадами усилителя осуществлена без переходной емкости. Положительное напряжение, подаваемое из анодной цепи лампы  $L_1$  на сетку лампы  $L_2$ , компенсируется отрицательным напряжением, подаваемым с катодного сопротивления  $R_5$  лампы  $L_2$ . Отрицательное напряжение превышает положительное на 5 в, в результате чего на сетке лампы  $L_2$  действует отрицательное смещение, равное 5 в и обеспечивающее нормальный режим работы лампы  $L_2$ . Применение связи между каскадами по постоянному току улучшает фазовую и частотную характеристики усилителя, что способствует получению глубокой обратной связи и стабильной его работе. Фазопереворачивающий каскад с лампой  $L_2$  собран по схеме усилителя с анодно-катодной нагрузкой, с которой и снимаются напряжения сигнала в противофазе. Симметричность работы фазопереворачивающего каскада зависит от точности подбора сопротивлений  $R_5$  и  $R_7$  (достаточна точность  $\pm 5\%$ ).

Третий каскад (предоконечный) собран по двухтактной схеме на двух триодах  $L_3$  и  $L_4$ . При монтаже усилителя нужно обратить внимание на взаимный подбор сопротивлений  $R_{11}$  и  $R_{13}$ , которые должны быть равными с точностью  $\pm 5\%$ . От точности подбора этих сопротивлений зависит симметрия предоконечного каскада.

Оконечный каскад собран по двухтактной схеме на двух



Фиг. 57. Принципиальная схема 15-ваттного усилителя с отрицательной обратной связью на четыре каскада.

Допустимая мощность рассеяния сопротивлений  $R_2, R_3, R_6, R_7, R_{16}$  и  $R_{18} - 1 \text{ вт}$ ,  $R_{11}, R_{13}, R_{17}$  и  $R_{21} - 2 \text{ вт}$ ;  $R_{22} - 3 \text{ вт}$ ; остальные  $< 0,25 \text{ вт}$ .  $R_{25} = 1200 \sqrt{R_H}$ , где  $R_H$  — сопротивление нагрузки, ом.

лампах  $L_5$  и  $L_6$  (лучевых тетрадах типа 6П3С или Г807 в триодном соединении). Триодное соединение ламп обеспечивает работу усилителя с меньшими нелинейными искажениями. Так, при использовании в оконечном каскаде ламп типа Г807 и

анодном напряжении 450 в усилитель отдает мощность 12 *вт* при нелинейных искажениях  $\gamma = 1\%$  и мощность 10 *вт* при  $\gamma = 0,3\%$ . Лампы работают при этом в следующем режиме: класс АВ<sub>1</sub>,  $I_{a0} = 110$  ма,  $U_c = -40$  в. В режиме, близком к классу А ( $I_{a0} \approx 120$  ма,  $U_c = -38$  в), усилитель отдает мощность 8 *вт* при нелинейных искажениях  $\gamma$  меньше 0,1%.

Сопротивление смещения в катодной цепи оконечных ламп  $R_{21}$  сделано переменным, что дает возможность подбирать правильный режим оконечного каскада. Потенциометр  $R_{17}$  служит для балансировки плеч оконечного каскада.

Катодные сопротивления в схеме усилителя не имеют блокирующих емкостей. Это сделано для улучшения частотной и фазовой характеристик усилителя.

**Выходной трансформатор.** Выходной трансформатор должен быть изготовлен с особой тщательностью, так как от него зависит качество работы всего усилителя.

Обмотки трансформатора обязательно должны быть секционированными. Приведенное сопротивление нагрузки  $R'_n = 10\,000$  ом. Сечение сердечника  $32 \times 45$  мм. Окно сердечника  $77 \times 17$  мм. Первичная обмотка  $10 \times 440$  витков ПЭ 0,31. Вторичная обмотка  $8 \times 84$  витков ПЭ 0,69. Намотка и соединение секций выполняются согласно описанию в гл. 4 и фиг. 51. Необходимо обратить особое внимание на точное соблюдение числа витков вторичной обмотки, так как иначе в соединенных параллельно секциях потечет уравнильный ток, бесполезно поглощающий отдаваемую усилителем мощность.

При намотке трансформатора нужно стремиться к тому, чтобы витки каждого слоя заполняли равномерно всю ширину каркаса. Каждый слой намотки изолируется от другого одним слоем конденсаторной бумаги. Секции изолируются между собой тремя слоями кабельной бумаги толщиной 0,1—0,15 мм.

Для работы на громкоговоритель, имеющий сопротивление звуковой катушки 3—4 ом, все 8 секций вторичной обмотки соединяются параллельно. Для работы с громкоговорителем, имеющим сопротивление звуковой катушки 14—16 ом, 4 секции вторичной обмотки на каждой половине каркаса соединяются параллельно и две группы, имеющие по 4 параллельно соединенных секции, соединяются последовательно между собой. Последовательное соединение всех секций вторичной обмотки дает высокоомный выход на нагрузку 200—250 ом, в качестве которой может

быть трансляционная линия. Индуктивность первичной обмотки трансформатора порядка 150—200 *гн*.

**Лампы и режим оконечного каскада.** В усилителе применены два двойных триода 6Н8С: в первом объединены лампы  $L_1$  и  $L_2$ , во втором —  $L_3$  и  $L_4$ . При отсутствии ламп 6Н8С можно применить 4 одинарных триода 6С2С или 6С5. В оконечном каскаде работают два лучевых тетрода Г-807 или 6ПЗС.

В табл. 4 приведены значения общего анодного тока  $I_{a0}$  для обеих ламп при  $U_a = 450$  в.

Таблица 4

Лампа	Общий анодный ток двух ламп $I_{a0}$ , <i>ма</i>	Мощность рассеяния на аноде каждой лампы, <i>вт</i>
Г-807	125	25
6ПЗС	110	21,5

Для измерения общего анодного тока  $I_{a0}$  миллиамперметр нужно включить в разрыв общей катодной цепи или в среднюю точку выходного трансформатора. Нужная величина  $I_{a0}$  устанавливается переменным сопротивлением  $R_{21}$ .

При помощи потенциометра  $R_{17}$  производят статическую балансировку оконечного каскада. Она заключается в уравнивании анодных токов обеих оконечных ламп. Балансировку очень удобно выполнять при помощи вольтметра постоянного тока, включенного между анодами ламп. Регулировкой потенциометра  $R_{17}$  добиваются нулевых показаний вольтметра, что соответствует точной балансировке. Вольтметр нужно установить на диапазон измерений 10 в на всю шкалу. Равенство анодных токов улучшает симметрию оконечного каскада и сводит к нулю постоянное подмагничивание сердечника выходного трансформатора.

Налаживание усилителя несложно. Усилитель работает очень устойчиво и дает прекрасные результаты.

**Отрицательная обратная связь.** Как уже отмечалось, устойчивость работы усилителя зависит от качества выходного трансформатора. Глубина обратной связи регулируется сопротивлением  $R_{25}$ , величина которого зависит от сопротивления звуковой катушки громкоговорителя и может быть определена по формуле

$$R_{25} = 1200 \sqrt{R_n}$$

где  $R_n$  — сопротивление звуковой катушки, *ом*.

Конденсатор  $C_{10}$  и сопротивление  $R_{26}$ , шунтирующие сопротивление анодной нагрузки  $R_3$  лампы  $L_1$ , корректируют фазовую характеристику усилителя на самых высоких частотах диапазона и тем повышают устойчивость его работы.

Глубина обратной связи в усилителе порядка 20 дБ. При такой глубокой обратной связи выходное сопротивление усилителя очень мало и равно приблизительно 0,55 ом при работе на нагрузку 15 ом. Такое низкое выходное сопротивление обеспечивает очень эффективное затухание подвижной системы громкоговорителя и благоприятно сказывается на качестве звучания.

**Питание усилителя.** В выпрямителе используется силовой трансформатор, повышающая обмотка которого должна быть рассчитана на переменное напряжение 400—425 в на каждой половине обмотки при токе нагрузки 150—200 ма. Обмотка для накала кенотрона рассчитана на 5 в и 3 а, а обмотка для накала ламп на 6,3 в и 4 а.

В фильтре выпрямителя используются два дросселя:  $Dr_1$  — 30 гн, 20 ма и  $Dr_2$  — 10 гн, 150 ма. Конденсаторы фильтра  $C_8$  и  $C_9$  — по 8 мкф (бумажные или бумагомасляные), рассчитанные на рабочее напряжение 600 в. Конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_5$  — по 8 мкф на рабочее напряжение 450—500 в (электролитические или бумажные).

**Конструктивное выполнение.** Для уменьшения фона и удобства размещения желательно усилитель и выпрямитель разместить на двух шасси, соединив их кабелем.

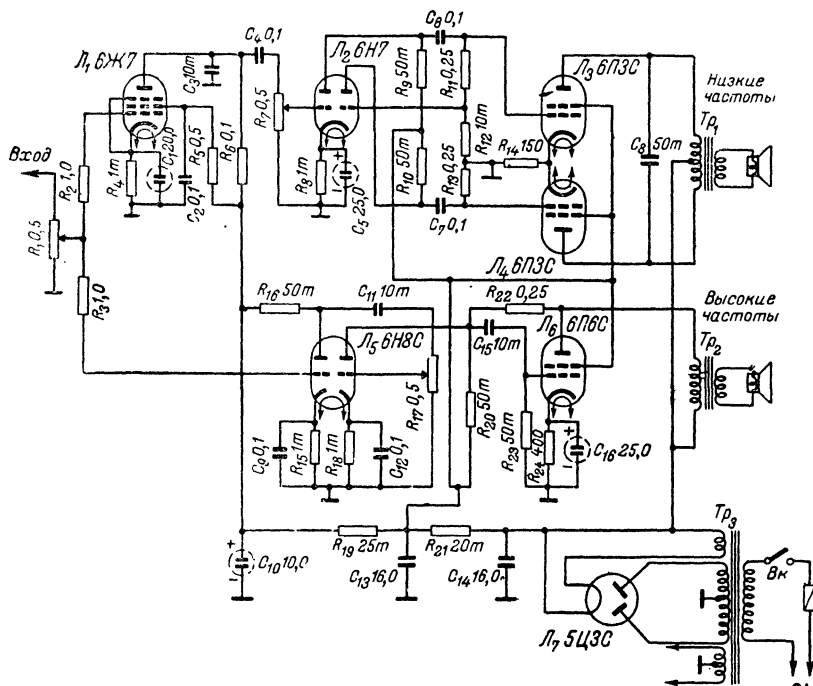
В том случае, если усилитель выполняется на одном шасси с выпрямителем, силовой и выходной трансформаторы нужно удалить на возможно большее расстояние от входных цепей усилителя и первой лампы. Силовой и выходной трансформатор, кроме того, должны быть разнесены подальше друг от друга.

Описанный усилитель требует отдельного тонкорректирующего каскада перед его входом. Тонкорректирующий усилитель должен обеспечить на входе оконечного усилителя напряжение сигнала с амплитудой 1,5—2 в. При этом оконечный усилитель будет отдавать мощность 10—15 вт.

#### 4. ДВУХКАНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

На фиг. 58 приведена схема двухканального усилителя. Он состоит из двух самостоятельных усилителей, каждый из которых пропускает определенную полосу частот и работает на громкоговоритель, рассчитанный на воспроизведение этой полосы.

**Низкочастотный звуковой усилитель.** Рассчитан на усиление полосы частот от 30 до 1 000 гц и имеет три каскада усиления. Первый каскад является усилителем напряжения и собран на пентоде 6Ж7 (или 6Ж8). Второй каскад (фазо-переворачивающий) собран на лампе 6Н7С (можно применить лампу 6Н8С). Третий оконечный каскад собран по двухтактной схеме на лампах 6П3С.



Фиг. 58. Принципиальная схема двухканального усилителя.

Допустимая мощность рассеяния сопротивлений  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_8$ ,  $R_{15}$  и  $R_{18}$  — 0,5 вт;  $R_9$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{16}$ ,  $R_{20}$  — 2 вт;  $R_{19}$  — 2 вт;  $R_{14}$ ,  $R_{24}$  — 10 вт;  $R_{21}$  — 20 вт; остальных — 0,25 вт.

В целях придания усилителю большей узкополосности (30—1 000 гц) в нем не использована отрицательная обратная связь. Для уменьшения усиления на частотах выше 1 000 гц анод лампы 6Ж7 и аноды ламп оконечного каскада шунтированы конденсаторами 10 000 и 50 000 мкмкф. Усиление в низкочастотном усилителе регулируется потенциометром  $R_7$ .

Выходной трансформатор  $Tr_1$  рассчитывается таким образом, чтобы при работе на соответствующий громкогово-

ритель, приведенное сопротивление нагрузки  $R'_n$  было равно 5 000 ом. При его конструировании и намотке можно не стремиться уменьшать индуктивность рассеяния, так как усиления высших частот в усилителе не требуется.

Обмотки трансформатора следует выполнить следующим образом. Каркас делится пополам перегородкой. В каждую половину укладываются первичная и вторичная обмотки в следующем порядке: сначала — половина первичной, затем — половина вторичной. Направления намотки половины первичной обмотки в обоих плечах противоположны. Вторичная обмотка наматывается в одном направлении. Конец первой половины вторичной обмотки переходит через прорезь в каркасе во вторую половину. Начало и конец вторичной обмотки выводят наружу. Начала каждой половины первичной обмотки соединяются вместе и присоединяются к плюсу выпрямителя, а концы — к анодам ламп оконечного каскада.

**Высокочастотный звуковой усилитель.** Рассчитан на усиление частот от 1 000 до 15 000 гц и имеет три каскада усиления. Первый и второй каскады, собранные на двойном триоде 6Н8С (или на двух лампах 6С5), являются усилителем напряжения. Третий оконечный каскад собран на лучевом тетроде 6П6С. В оконечном каскаде применена отрицательная обратная связь с анода лампы 6С5 через сопротивление  $R_{22}$  и конденсатор  $C_{15}$  на сетку этой же лампы.

Отрицательная обратная связь улучшает усиление высших частот и уменьшает нелинейные искажения. Применение небольших емкостей для блокировки сопротивлений смещения в первых двух каскадах и для связи между каскадами уменьшает усиление на низших частотах. Усиление в усилителе регулируется потенциометром  $R_{17}$ .

Выходной трансформатор  $Tr_2$  должен быть рассчитан на хорошее пропускание высших частот, для чего обмотки его нужно секционировать, используя цилиндрическое (слоевое) секционирование (гл. 4). Индуктивность первичной обмотки может быть небольшой и рассчитывается на усиление наинизшей частоты 1 000 гц. Приведенное сопротивление нагрузки  $R'_n = 5\,000$  ом.

Раздельное регулирование усиления в низкочастотном и высокочастотном усилителях воспринимается ухом как регулирование тона. Громкость регулируется потенциометром  $R_1$ , с которого напряжение сигнала подается через сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  на сетки обоих усилителей.



**Громкоговорители.** Для работы в двухканальном усилителе нужны два громкоговорителя. Первый громкоговоритель для воспроизведения самых низких частот с диффузором порядка 300 мм для лучшего воспроизведения низших частот должен быть заключен в специальный ящик — фазоинвертер. Второй громкоговоритель, предназначенный для воспроизведения частот от 1 000 гц и выше, должен быть небольшим (диаметр диффузора 75—120 мм).

Для правильной работы двух громкоговорителей они должны быть соответствующим образом сфазированы, т. е. концы звуковых катушек должны быть включены так, чтобы диффузоры колебались одновременно в одну сторону (синфазно). Правильное включение концов звуковых катушек можно определить по наибольшей громкости звучания при подаче на вход усилителя синусоидального напряжения с частотой 1 000 гц.

**Выпрямитель.** Оба усилителя питаются от одного выпрямителя, собранного на лампе 5ЦЗС.

Напряжение каждой половины повышающей обмотки силового трансформатора  $Tr_3$  должно быть рассчитано на 350 в при токе до 200 ма. Обмотка для накала ламп рассчитывается на 6,3 в и 4 а, а обмотка для накала кенотрона — на 5 в и 4 а.

Фильтр выпрямителя реостатно-емкостного типа. Конденсатор  $C_{14}$  16 мкф — бумагомасляный на рабочее напряжение 600 в, а конденсаторы  $C_{10}$  и  $C_{13}$  по 16 мкф — на 450 в (электролитические). Аноды ламп оконечных каскадов подключены к выпрямителю до фильтра.

## Глава седьмая

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И НАЛАЖИВАНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

## 1. ЗАМЕЧАНИЯ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ УСИЛИТЕЛЕЙ

Усилитель, рассчитанный на выходную мощность 8—25 вт, целесообразно выделять в виде самостоятельного блока, имеющего отдельный от приемника и цепей тонкорекции выпрямитель. Это является самым надежным методом устранения паразитных связей между мощным усилителем и приемником.

Вынесение мощного усилителя в отдельный блок позволяет удалить его от приемника и каскадов тонкорекции,

дает возможность сделать сам радиоприемник более компактным и удобным для управления. На шасси приемника в этом случае остаются: сам приемник, маломощный выпрямитель и корректирующий усилитель с ручками регулирования тона и громкости. Здесь же устанавливается переключатель рода работы, позволяющий подключать вход усилителя к различным источникам сигнала, например к выходу детектора приемника, граммофонному звукоснимателю, выходу частотного детектора приемника звукового сопровождения телевизора и т. д.

Мощный усилитель в свою очередь также целесообразно выполнять в виде двух блоков: блока усилителя и блока выпрямителя к нему. Удаление выпрямителя от усилителя предотвращает наводки переменного тока на входные цепи усилителя.

При конструировании усилителей необходимо обратить внимание на качество заземления (гл. 5).

Детали и лампы, сильно нагревающиеся при работе усилителя, нужно располагать подальше от электролитических и бумажных конденсаторов. Сердечники дросселей, силовых и выходных трансформаторов должны быть заземлены.

Лампы в усилителе нужно располагать так, чтобы лампа оконечного каскада была рядом с выходным трансформатором, а лампы первых каскадов — подальше от выходного и силового трансформаторов.

## **2. НАЛАЖИВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ И МЕРЫ БОРЬБЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ**

В том случае, когда конструкция усилителя тщательно продумана и монтаж выполнен с соблюдением необходимых правил, наладивание усилителя не отнимает много времени. Можно сказать, что усилитель, смонтированный по хорошо отработанной схеме и при соблюдении всех указанных в схеме величин, вообще не потребует особого наладивания; наладивание при этом сводится к проверке правильности монтажа, установке исходных напряжений питания (на выходах звеньев фильтра выпрямителя) и проверке правильности подключения концов выходного трансформатора к цепи отрицательной обратной связи.

В двухтактных усилителях, имеющих регулировку баланса плеч, нужно произвести установку баланса по равенству анодных токов ламп оконечного каскада. При этом может потребоваться регулирование смещения ламп оконечного каскада. Это выполняется подгонкой сопротивления

в катодной цепи, для чего к концам сопротивления подключается вольтметр.

Если конструкция усилителя продумана плохо, монтаж выполнен неудачно и детали не соответствуют величинам, указанным в схеме, налаживание усилителя может превратиться в кропотливую работу. В таком усилителе не исключено появление самовозбуждения и фона.

Налаживание усилителя нужно производить в определенной последовательности.

После проверки правильности монтажа усилителя нужно включить питание и по каскадно проверить режим работы ламп усилителя. Для проверки режима нужно пользоваться миллиамперметром и высокоомным вольтметром. В случае значительного отклонения режима от нормального (рекомендованного для данного типа лампы) нужно произвести подгонку, изменяя величины катодных сопротивлений и сопротивлений фильтра выпрямителя.

Дальнейшее налаживание заключается в устранении самовозбуждения, если оно наблюдается. Прежде всего нужно попробовать поменять местами концы вторичной обмотки выходного трансформатора. Если это не помогает, нужно пробовать совсем отсоединить цепь обратной связи. Исчезновение самовозбуждения укажет на то, что причиной его была слишком сильная обратная связь. Тогда нужно попробовать уменьшить ее. В этом случае большую роль играет качество выходного трансформатора.

Убедившись в невозможности устранить генерацию регулировкой цепи обратной связи, нужно пробовать включить небольшие (порядка 100  $\Omega$ ) сопротивления последовательно в цепь управляющей сетки лампы оконечного каскада. Включением таких сопротивлений (называемых антипаразитными) иногда удается прекратить генерацию на высоких частотах.

При невозможности устранить самовозбуждение указанными мерами нужно попытаться отыскать провода монтажа, являющиеся источником емкостной связи между цепями сетки и анода. Найдя место паразитной емкостной связи, нужно переделать монтаж или экранировать один из проводов. Обычно этих мер бывает достаточно для устранения самовозбуждения усилителя на высоких частотах.

Самовозбуждение усилителя на самых низких частотах обычно устраняется увеличением развязок в цепях анода.

Меры борьбы с фоном переменного тока были достаточно подробно разобраны в гл. 5.

После установления нормального режима в усилителе на вход его нужно подать напряжение сигнала. При этом удобно пользоваться напряжением от звукоосциллографа при проигрывании заведомо хорошей пластинки. Проигрывание можно повторять многократно, сравнивая качество звучания при различных переделках в усилителе.

Самым лучшим видом контроля при налаживании усилителя является просматривание формы напряжения на экране осциллографа при подаче на вход усилителя напряжения соответствующей амплитуды от звукового генератора. Осциллограф подключается к различным точкам схемы, что дает возможность определить источник ненормальной работы усилителя и устранить его. При отсутствии осциллографа и звукового генератора регулирование усилителя придется выполнять на слух.

### **3. ГРОМКОГОВОРТЕЛЬ ДЛЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЗВУКО-ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ**

Современный усилитель низкой частоты в состоянии обеспечить неискаженное усиление полного звукового диапазона частот с ничтожными нелинейными искажениями. Однако все качества усилителя могут быть сведены к нулю, если громкоговоритель, предназначенный для работы с этим усилителем, не в состоянии воспроизвести нужную полосу частот с малыми нелинейными искажениями.

Какой же должна быть электроакустическая система для высококачественной установки?

Для воспроизведения полосы частот 30—15 000 гц нужен агрегат, состоящий минимум из двух громкоговорителей.

Первый громкоговоритель предназначается для воспроизведения самых низких частот от 30 до 1 000—1 500 гц. Такой громкоговоритель электродинамического типа должен иметь диффузор порядка 300 мм. Для улучшения воспроизведения самых низких частот желательно заключить его в специальный ящик — фазоинвертер. Применение фазоинвертера позволяет значительно улучшить отдачу громкоговорителем низших частот.

Второй громкоговоритель, также электродинамического типа (часто называемый пищалкой), предназначается для воспроизведения частот от 1 000—1 500 до 15 000 гц. Конструкция такого громкоговорителя может быть различной.

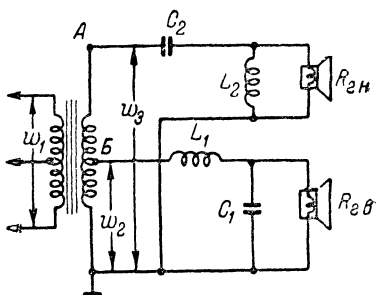
Наилучшей отдачей высоких звуковых частот обладают рупорные громкоговорители, подвижная система которых

представляет собой легкую алюминиевую мембрану с прикрепленной к ней звуковой катушкой. Колебания мембраны передаются в рупор небольших размеров. Для уменьшения направленности излучения рупор пищалки часто делают секционированным. Для любительской установки можно в качестве пищалки применить маленький электродинамический громкоговоритель с диаметром диффузора 75—120 мм.

Высокочастотный громкоговоритель нужно располагать над низкочастотным.

Отдельным и очень важным вопросом является способ подключения агрегата громкоговорителей к выходу усилителя. Задача здесь заключается в том, чтобы каждый из громкоговорителей получал от усилителя только тот диапазон частот, на который он рассчитан. Только при четком разделении частот можно получить хорошую работу агрегата.

Существует много схем специальных фильтров, разделяющих спектр звуковых частот на выходе усилителя на два канала. Общие требования, предъявляемые к этим фильтрам, — по возможности более полное отделение одного диапазона частот от другого при минимальных потерях мощности. Схемы фильтров должны обеспечивать сохранение согласования сопротивлений звуковых катушек обоих громкоговорителей с анодной цепью ламп оконечного каскада усилителя. Наилучшим решением вопроса является применение двух самостоятельных каналов усиления.



Фиг. 59. Принципиальная схема разделительного фильтра для включения агрегата из двух громкоговорителей.

Не имея возможности останавливаться более подробно на конструкции разделительных фильтров, приводим только принципиальную схему (фиг. 59) и краткий расчет такого фильтра. Фильтр предназначен для подключения двух громкоговорителей, сопротивление звуковых катушек которых может быть неодинаковым.

Число витков первичной обмотки  $w_1$  выходного трансформатора определяется обычным путем на основании электрического и конструктивного расчета трансформатора.

Число витков  $w_2$  части вторичной обмотки (для подключения высокочастотного громкоговорителя, имеющего сопротивление звуковой катушки  $R_{зв}$ ) определяется по формуле

$$w_2 = w_1 \sqrt{\frac{R_{зв}}{\eta R_n}},$$

где  $R_{зв}$  — сопротивление звуковой катушки высокочастотного громкоговорителя, *ом*;

$\eta$  — к. п. д. выходного трансформатора, равный 0,85—0,9;

$R_n'$  — приведенное сопротивление анодной нагрузки, найденное в результате электрического расчета выходного каскада усилителя, *ом*.

Так же находится число витков  $w_3$  всей вторичной обмотки для подключения низкочастотного громкоговорителя:

$$w_3 = w_1 \sqrt{\frac{R_{зн}}{\eta R_n}},$$

где  $R_{зн}$  — сопротивление звуковой катушки низкочастотного громкоговорителя, *ом*.

Индуктивности и емкости фильтра определяются по формулам:

$$L_1 = \frac{0,226 \cdot R_{зн}}{f_0}; \quad C_1 = \frac{0,113}{R_{зн} \cdot f_0};$$

$$L_2 = \frac{0,226 \cdot R_{зв}}{f_0}; \quad C_2 = \frac{0,113}{R_{зв} \cdot f_0'}.$$

Здесь  $L_1$  и  $L_2$  — индуктивности дросселей, *гн*;

$C_1$  и  $C_2$  — емкости конденсаторов, *ф*;

$f_0$  — частота, являющаяся границей разделения частотного диапазона на два канала, *гц*.

Частота  $f_0$  выбирается в зависимости от формы частотных характеристик громкоговорителей.

На схеме (фиг. 59) условно показано, что число витков  $w_3$  больше  $w_2$ . В результате расчета может оказаться, что  $w_2$  будет больше  $w_3$ . Тогда провод, идущий от конденсатора  $C_2$ , нужно подключить к точке *Б* схемы, а катушку индуктивности  $L_1$  — к точке *А*.



Цена 2 руб. 80 коп.

## ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

### МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

*под общей редакцией академика А. И. БЕРГА*

#### ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ И ПОСТУПИЛИ В ПРОДАЖУ

- БАУМГАРТС В. Ф., Сельская радиопередвижка, стр. 40, ц. 1 р.  
ГАНЗБУРГ М. Д., Трехламповый супергетеродин, стр. 32, ц. 80 к.  
ДОЛЬНИК А. Г., Выпрямители с умножением напряжения, стр. 32, ц. 80 к.  
ЕВДОКИМОВ П. И., Методы и системы многоканальной связи, стр. 64, ц. 1 р. 50 к.  
КОМАРОВ А. В. и ЛЕВИТИН Е. А., Радиовещательные приемники „Москвич“ и „Кама“, стр. 12, ц. 90 к.  
ЛЕВАНДОВСКИЙ Б. А., Шкалы и верньерные устройства, стр. 64, ц. 1 р. 50 к.  
ЛЕВИТИН Е. А., Новое в изготовлении радиоаппаратуры, стр. 72, ц. 1 р. 70 к.  
ТУТОРСКИЙ О. Г., Простейшие любительские передатчики и приемники УКВ, стр. 56, ц. 1 р. 25 к.  
ПРОЗОРОВСКИЙ Ю. Н., Любительские коротковолновые радиостанции, стр. 56, ц. 1 р. 40 к.  
РАХТЕЕНКО А. М., Карманные радиоприемники, стр. 16, ц. 40 к.  
ШУМИХИН Ю. А., Введение в импульсную технику, стр. 112, ц. 2 р. 70 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ КНИЖНЫХ МАГАЗИНАХ  
И КИОСКАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЗАКАЗОВ НЕ ВЫПОЛНЯЕТ